

# Blendung: Grundlagen

Webinar Blendtool, 4. April 2023, Prof. Dr. Christof Bucher

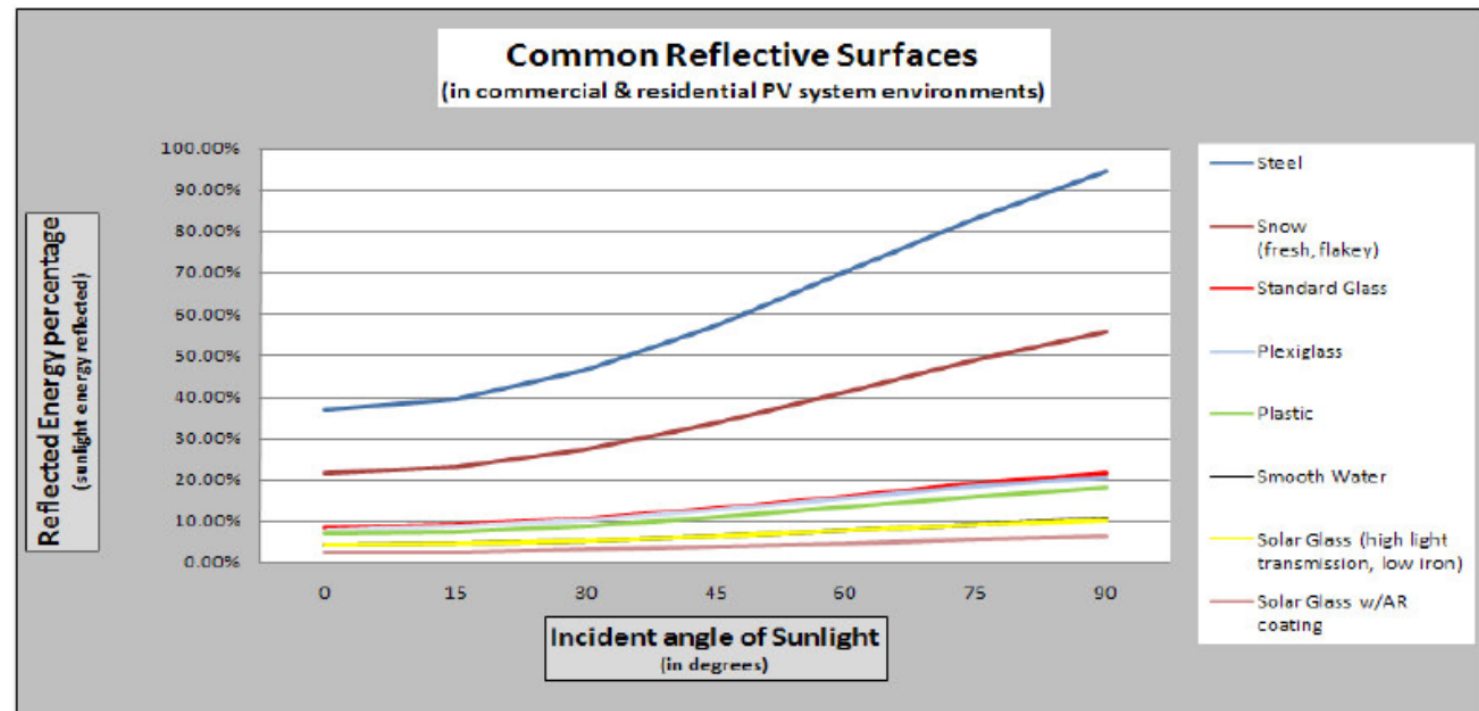
# Inhalt

1. Reflexion
2. Definition Blendung
3. Leuchtdichte ( $\text{cd/m}^2$ )
4. Bündelaufweitung
5. Vorschlag Definition «blendfrei»
6. Sonnenstrands- und Reflexionsdiagramm
7. Empfehlung

# Reflexion

# Reflexion

- Jede Oberfläche reflektiert einen Teil des auf sie einfallenden Lichts
- «Albedo»: Teil der Sonnenstrahlung, der reflektiert wird. Standardwert 20% (bedeutet, dass 20% des Sonnenlichts an der Oberfläche reflektiert werden)
- PV-Module sind reflexionsarm: Sie reflektieren nur ca. 5-10% des Lichts



# Definition Blendung



# Was ist eine Blendung?



PV Modul mit Blendung, Basler & Hofmann AG

## Fotoapparat

Sättigung des Sensors. Keine Unterscheidung zwischen «schwacher» und «starker» Blendung

## Auge

«Absolutblendung»

Das Auge kann sich nicht mehr an die Helligkeit anpassen (Pupille ist schon maximal verkleinert)

# Verschiedene Blendbegriffe

## 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.  $100'000 \text{ cd/m}^2$ .

# Die Leistung der Blendung ist wenig relevant



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



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

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

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



# 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 ( $\text{cd/m}^2$ )
- 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, «Steuerfuss der Gemeinde» ...)
- weitere Faktoren

# Leuchtdichte (cd/m<sup>2</sup>)

# Leuchtdichte («Helligkeit einer Oberfläche»)

## Leuchtdichte in Candela pro Quadratmeter (cd / m<sup>2</sup>)

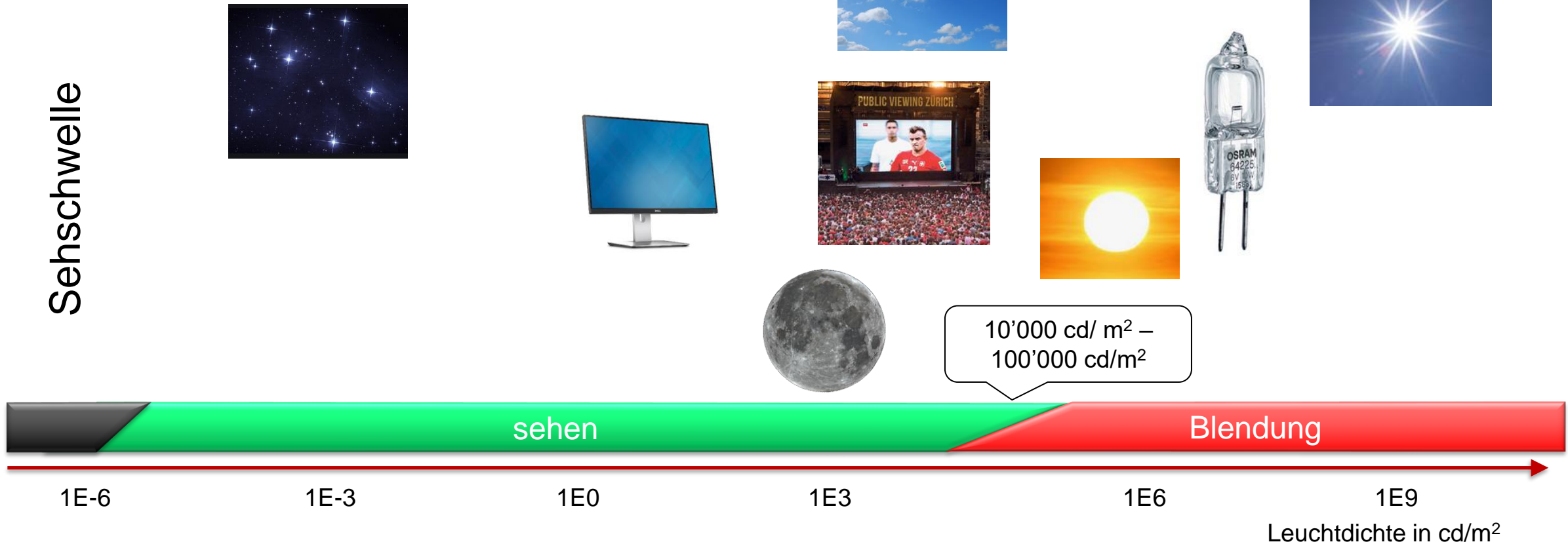
«Die Leuchtdichte einer Fläche bestimmt, mit welcher Flächenhelligkeit das Auge die Fläche wahrnimmt und hat daher von allen photometrischen Größen den unmittelbarsten Bezug zur optischen Sinneswahrnehmung» (Wikipedia).

→ Die Leuchtdichte gibt an, wie gross der Lichtstrom von einer bestimmten Fläche in eine bestimmte Richtung ausgeht.

## Leuchtdichten

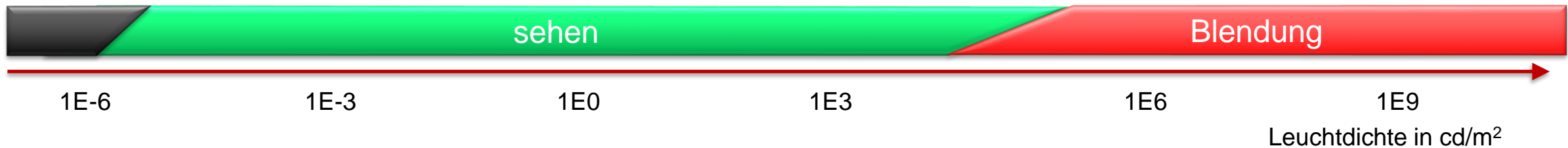
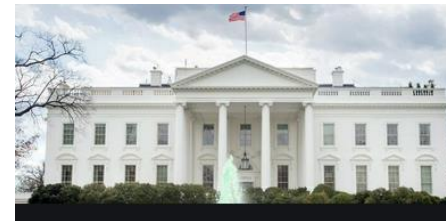
Quelle	Leuchtdichte (cd/m <sup>2</sup> )
Sonnenscheibe am Mittag	1'600'000'000
Draht einer Halogenlampe	25'000'000
Sonnenscheibe am Horizont	6'000'000
Leuchtstoffröhre	11'000
Klarer Himmel	8'000
Oberfläche des Mondes	2'500
Bildschirm	300
Sehschwelle	0.000 003

# Leuchtdichte von Lichtquellen



# Leuchtdichte der Gebäudehülle

Sehschwelle





# Leuchtdichte von PV-Modulen

Sehschwelle

Satiniertes Glas,  
 $10'000\text{cd/m}^2$



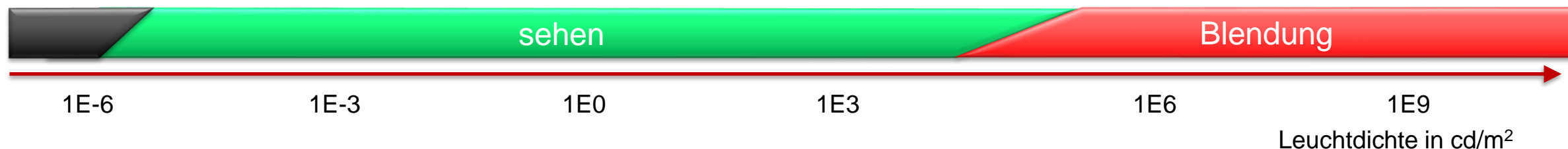
AR-Solarglas,  
 $500'000\text{cd/m}^2$



Floatglas, Solarglas,  
nicht im Blendstrahl,  
 $1'000\text{cd/m}^2$



Floatglas,  
 $10'000'000\text{cd/m}^2$



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

# Welche Gläser blenden?



Fensterglas

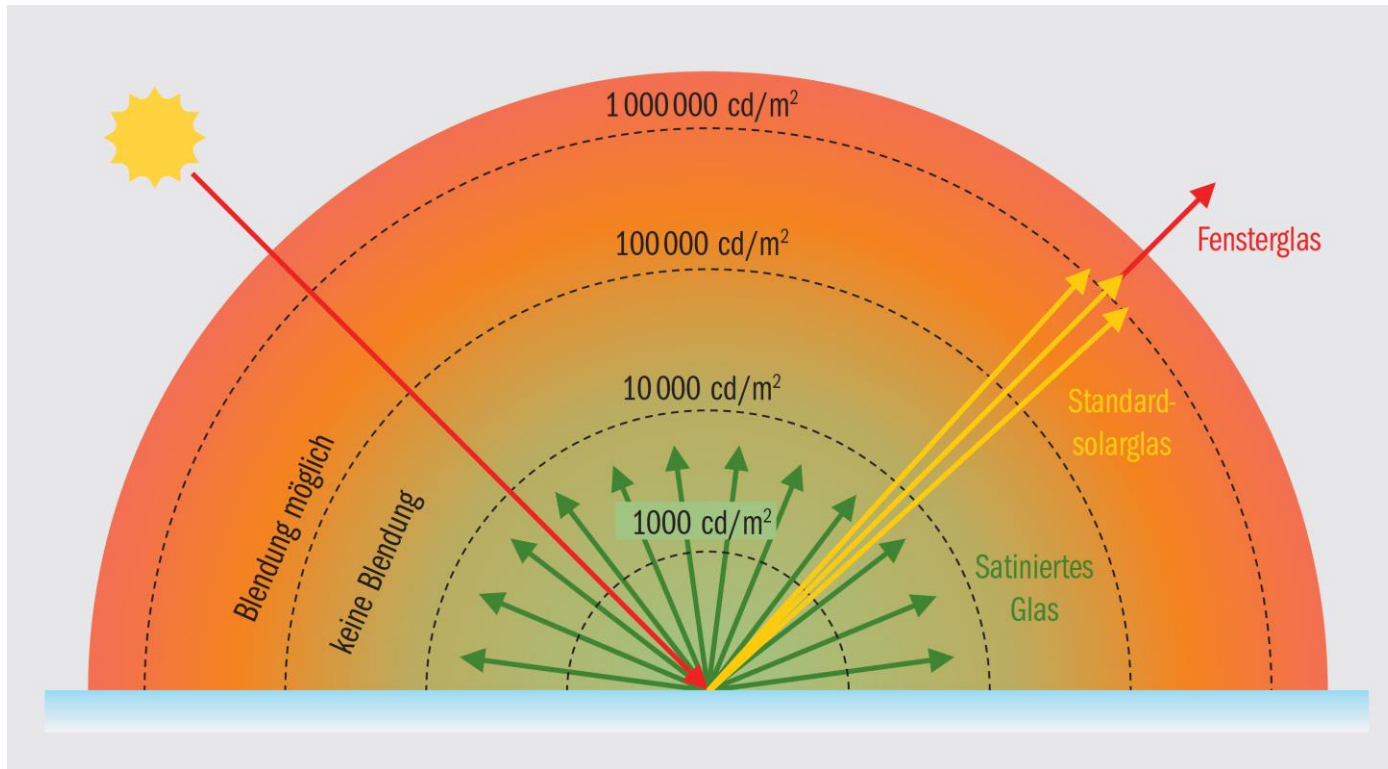
AR-Glas

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

# Bündelaufweitung

# Bündelaufweitung: Reflexionsstrahlen weiten sich auf



Christof Bucher, Photovoltaikanlagen, Faktor Verlag 2021

- Die «Menge» des an einer Oberfläche reflektierten Lichts ist wenig relevant für die Blendung
- Der «Glanz» (die Rauheit) der Oberfläche ist relevant.
- Weisse Wand: Reflektiert ca. 50%, Leuchtdichte ca. 20'000 cd/m<sup>2</sup>
- PV-Modul: Reflektiert ca. 5%, Leuchtdichte ca. 1'000'000 cd/m<sup>2</sup>



# Methoden zur Streuung der Reflexionen



Glasbearbeitungsarten, SPF Rapperswil

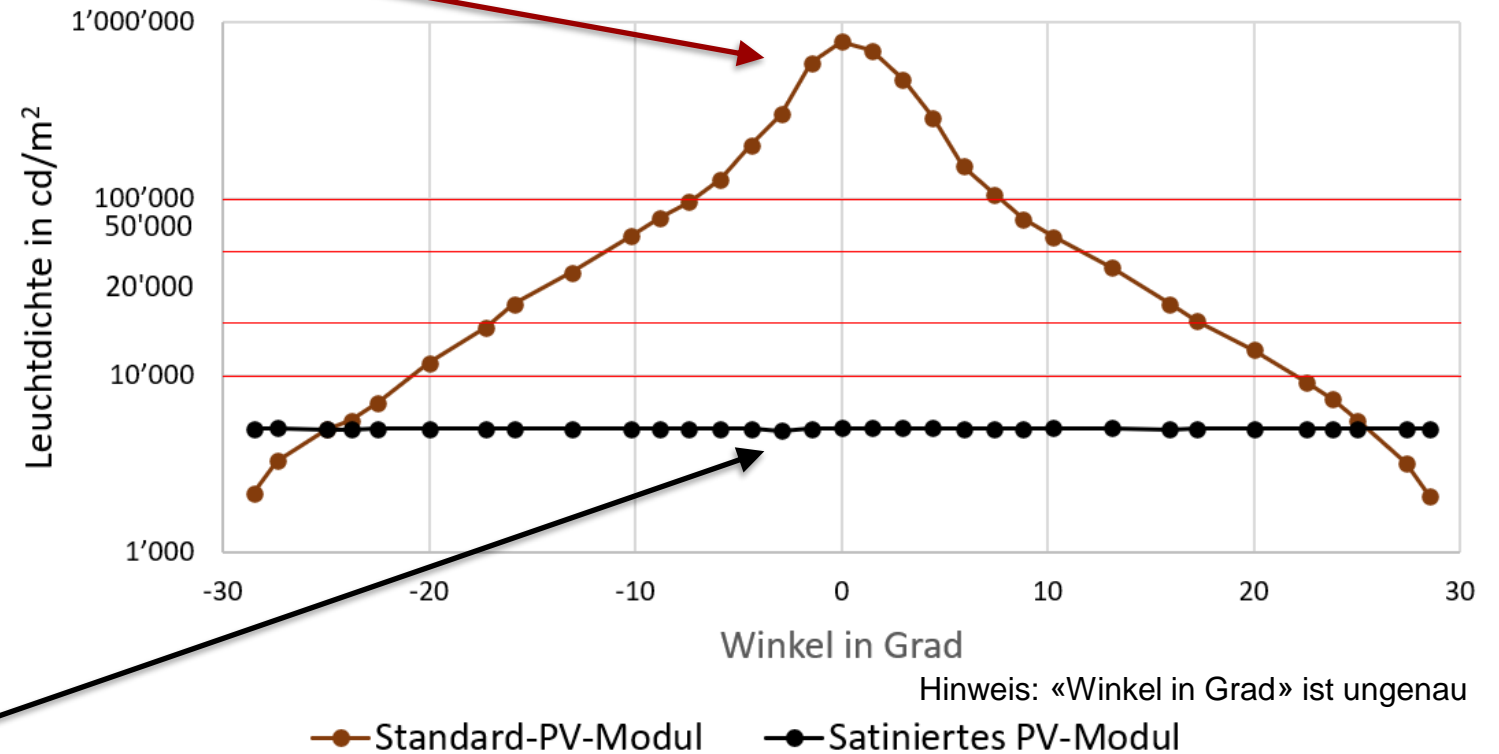
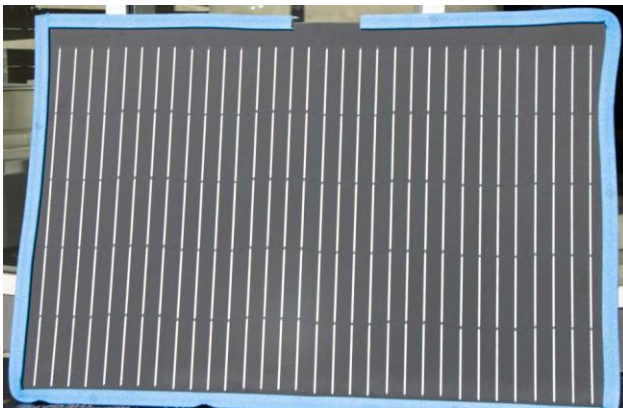
## Glasbearbeitung:

- AR-Coating, Solarglas
- Strukturiertes Glas (Prismaglas)
- Sandstrahlen
- Satinieren (ätzen, chemisch)

## Beschichtung (Erfahrungen fehlen!)

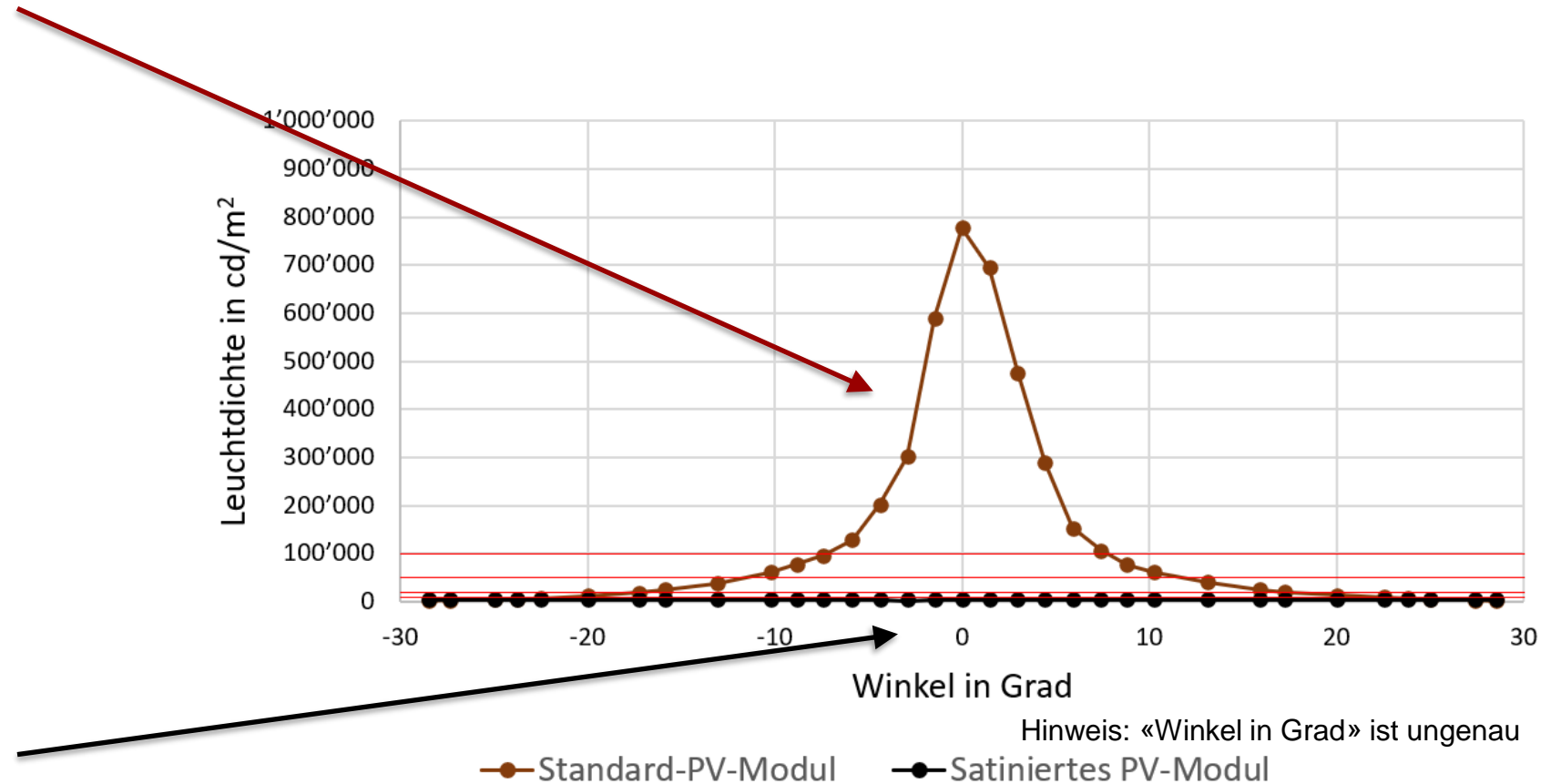
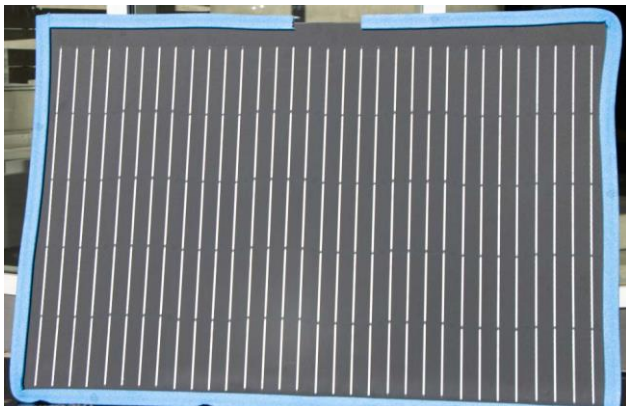
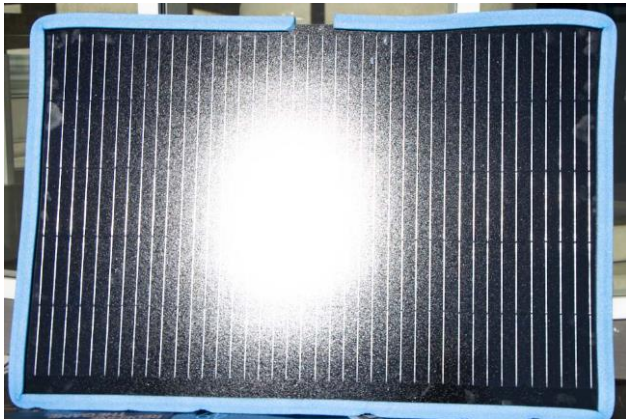
- Folie
- Anstrich

# Vergleich Reflexion Standardmodul vs. satiniertes Modul



Berner Fachhochschule, Christof Bucher

# Vergleich Reflexion Standardmodul vs. satiniertes Modul



Berner Fachhochschule, Christof Bucher

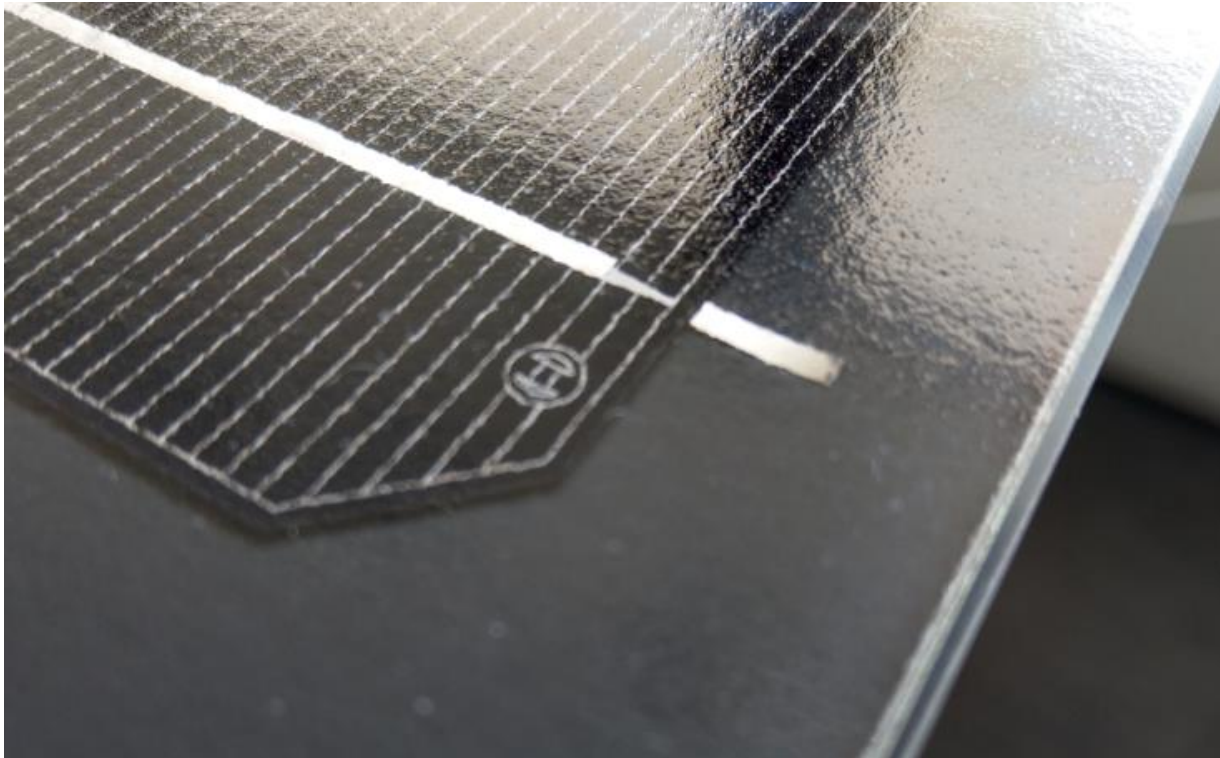


# Floatglas – Solarglas – satiniertes Glas – Prototyp



Berner Fachhochschule, Christof Bucher

# Solarglas (antireflexbeschichtet)

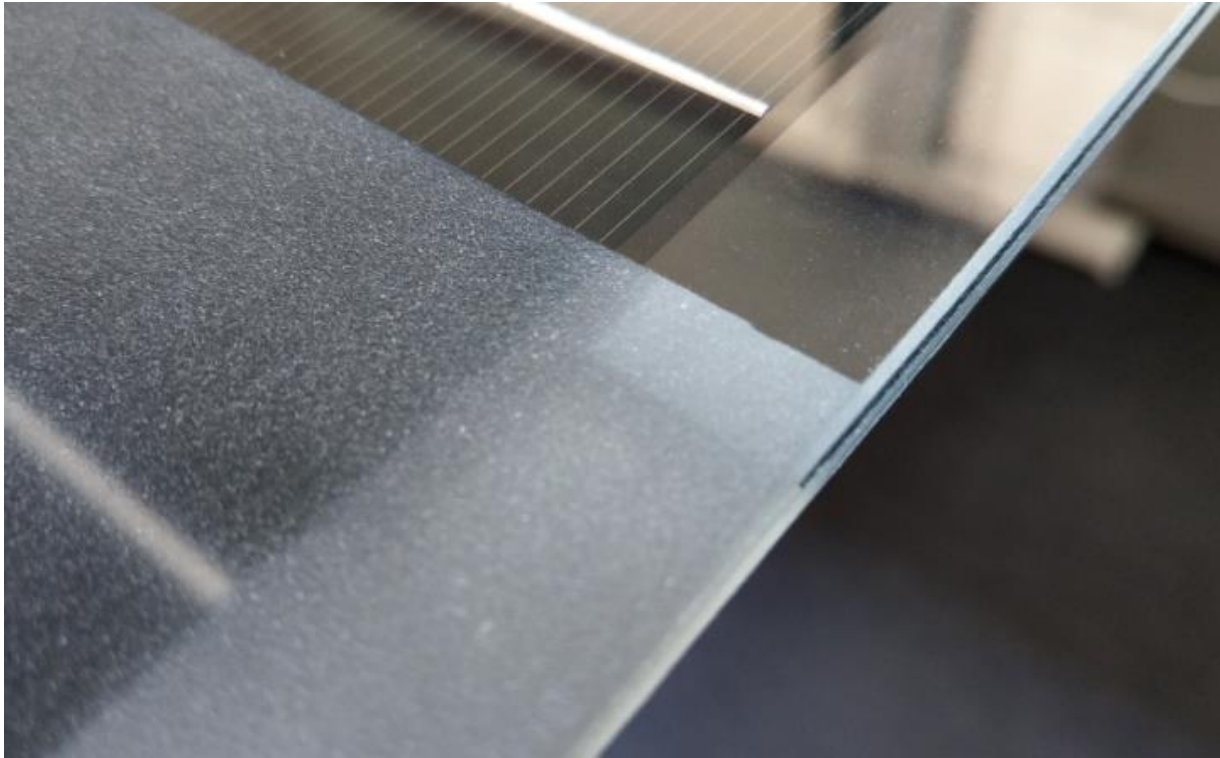


Solarglas antireflexbeschichtet, Basler & Hofmann AG

- Standard-Solarglas
- Praktisch bei allen PV-Modulen in Verwendung
- Gilt als «reflexionsarm», löst aber das Blendproblem nicht in allen Fällen.
- Bündelaufweitung ca.  $5^\circ$
- Verlängert die Blenddauer, schwächt dafür die Intensität der Blendung.



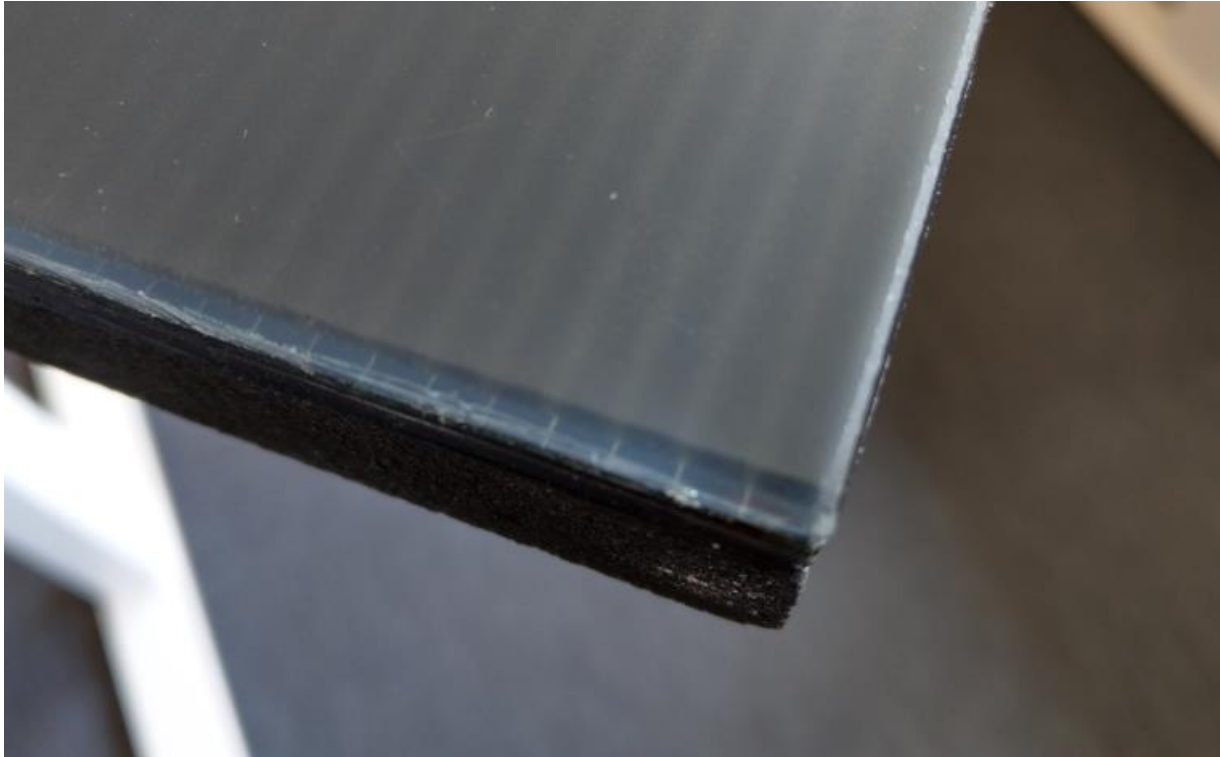
# Sandgestrahltes Glas



Sandgestrahltes Glas, Basler & Hofmann AG

- Starker Bündelaufweitungseffekt
- Kaum Ertragseinbussen
- Wird heute kaum verwendet
- Verschmutzung?
- Langlebigkeit?
- Stabilität (Spannungsrisse)?

# Satiniertes Glas



Satiniertes Glas, Basler & Hofmann AG

- Geätzt mittels chemischem Prozess (vor der Härtung)
- Typisches Vorgehen für mattes Glas-Erscheinungsbild
- Nicht verfügbar bei «Billigen Importmodulen»
- Aufpreis für die Glasbehandlung: ca. CHF 35.- / m<sup>2</sup>
- Verschmutzung?
- Langlebigkeit?
- Optische Stabilität?

# Strukturiertes Glas (Prismaglas)



Strukturiertes Glas (Prismaglas), Basler & Hofmann AG

- Glas wird beim Herstellungsprozess gewalzt.
- starke Bündelaufweitung, Blendung wird (vermutlich) weitgehend verhindert.
- gewöhnungsbedürftiges Erscheinungsbild
- Verschmutzung?



Bildschirm mit Folie, [https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/81YeNubTYOL.\\_SX522\\_.jpg](https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/81YeNubTYOL._SX522_.jpg)

- Beschichtungen sind nicht langzeitstabil
  - Erfahrungen fehlen
  - Haftung von Folien oder Beschichtungen an PV-Modulen unklar
  - Lernen aus anderen Branchen?
- Beispiel: Matte Folie zur Glanzreduktion eines Bildschirms

# Vorschlag Definition blendfrei



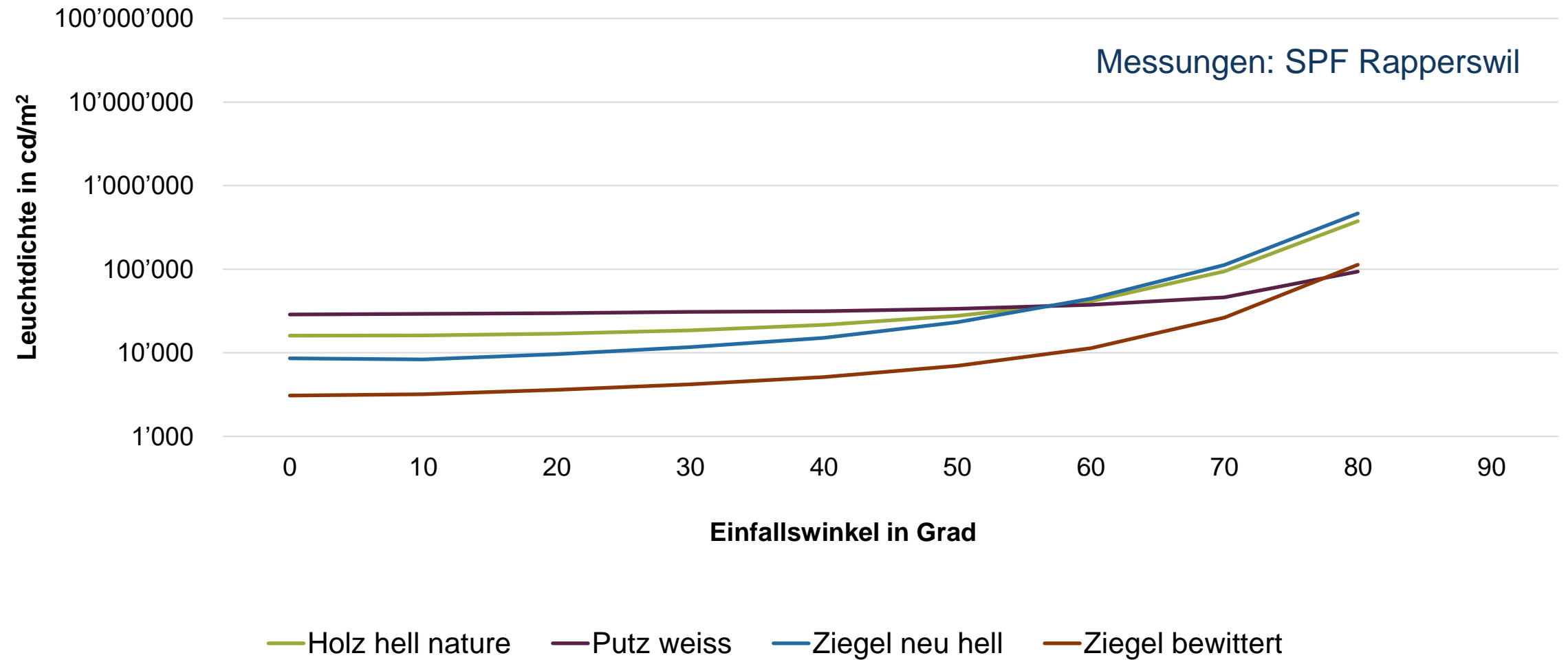
# Definition «blendfrei»

- Praktisch jedes PV-Modul ist «reflexionsarm»
- Nur wenige PV-Module sind aber «blendarm» oder gar «blendfrei»
- Eine anerkannte Definition «blendfrei» gibt es noch nicht. Bei flachen Winkel beginnt praktisch jede Oberfläche zu blenden.

## Lösungsansatz

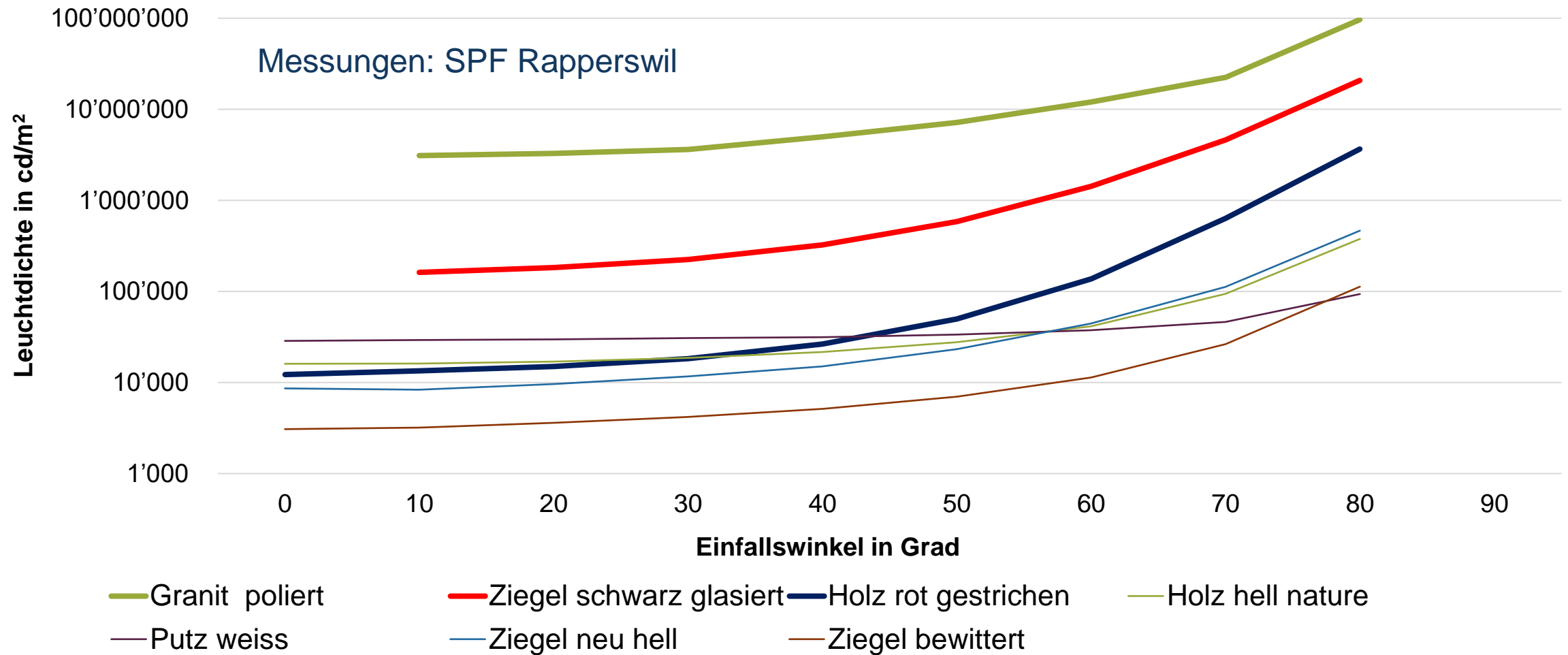
- Vermessung von Oberflächen, die aus «Erfahrung» nicht blenden (Ziegel, Holz)
- Definition für «blendfrei»: Werte unterhalb der höchsten Leuchtdichte eines nicht blendenden Materials.
- Konsequenz: auch «blendfreie» Oberflächen können blenden, werden aber nicht als blendend empfunden.

# Holz, Putz und Ziegel blenden nicht



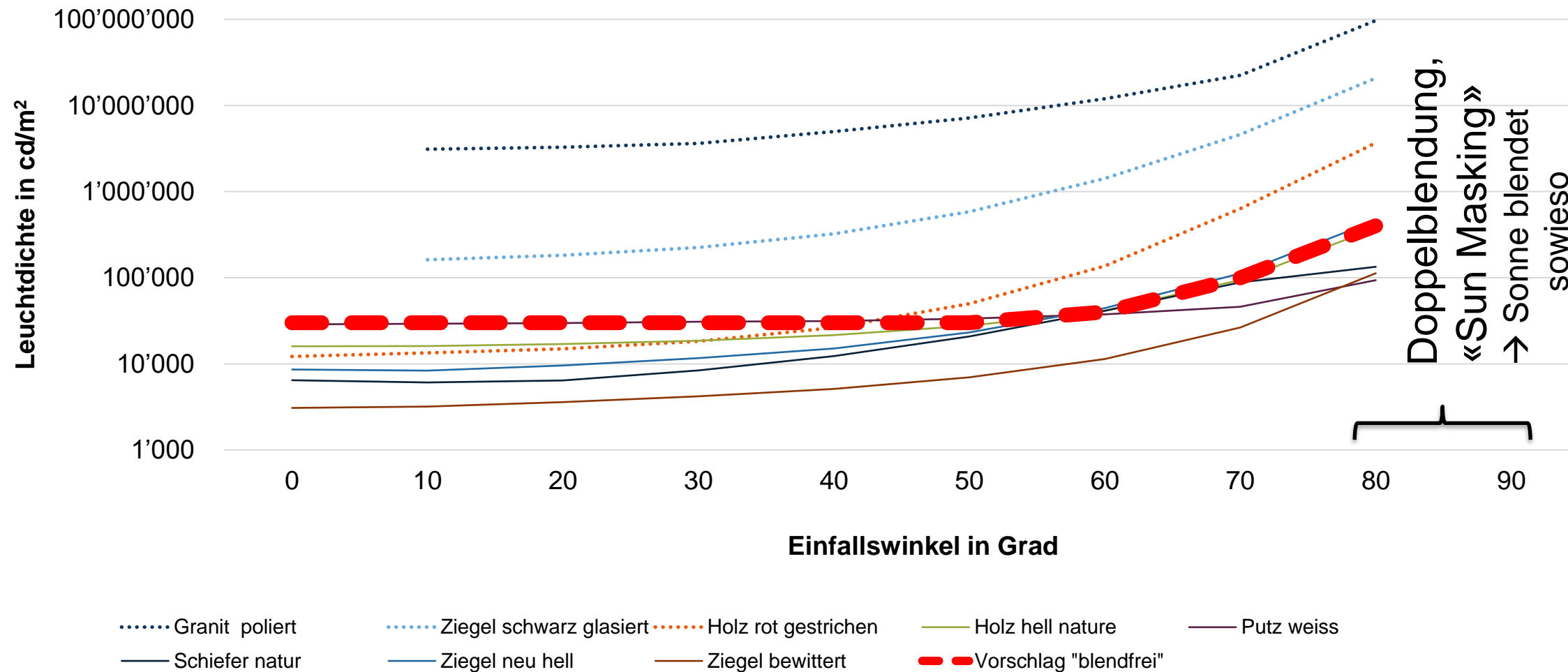
Projekt «reflexionsarm», Christof Bucher, BFH. Daten: SPF Rapperswil

# Polierter Stein, glasierte Ziegel, gestrichenes Holz können stark blenden



Projekt «reflexionsarm», Christof Bucher, BFH. Daten: SPF Rapperswil

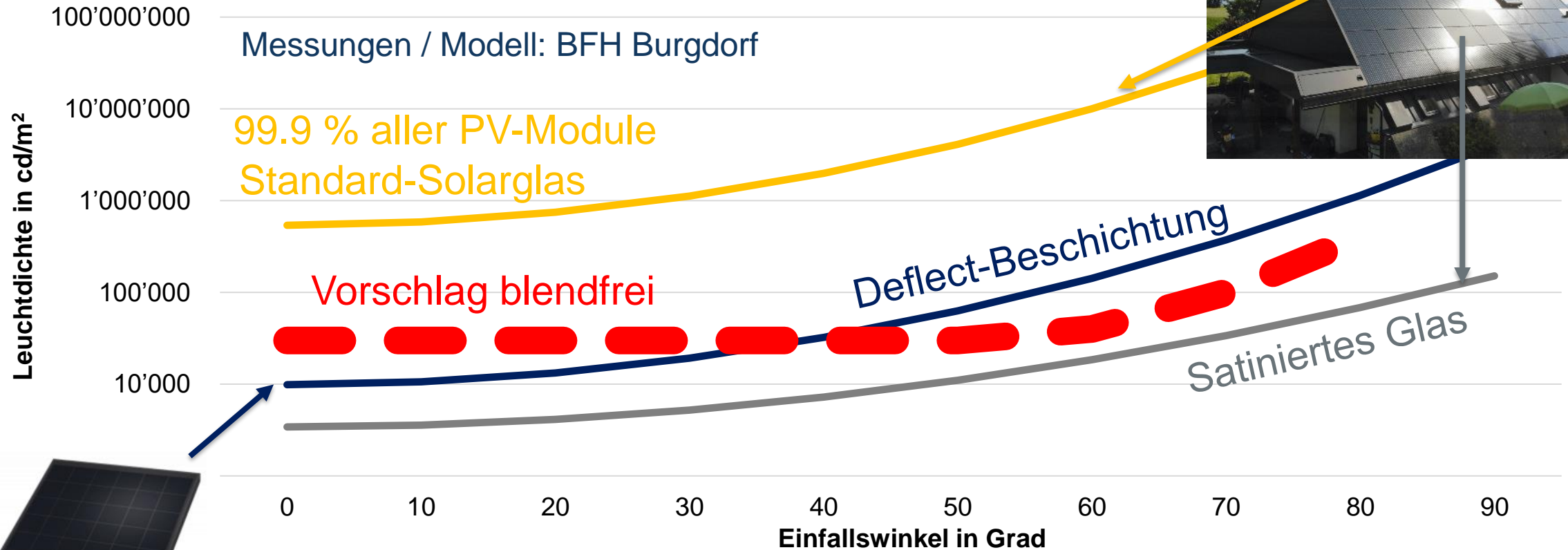
# Vorschlag: Unterhalb der roten Linie = keine Blendung



Projekt «reflexionsarm», Christof Bucher, BFH. Daten: SPF Rapperswil



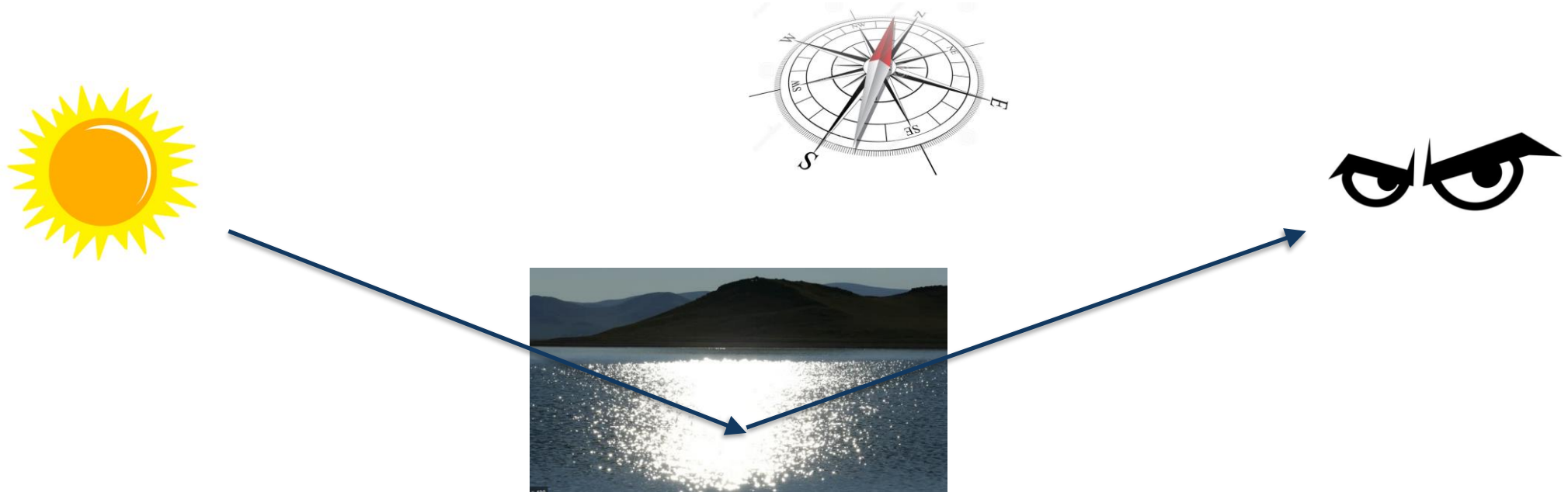
# Blenden PV-Module?



er, BFH. Daten: SPF Rapperswil

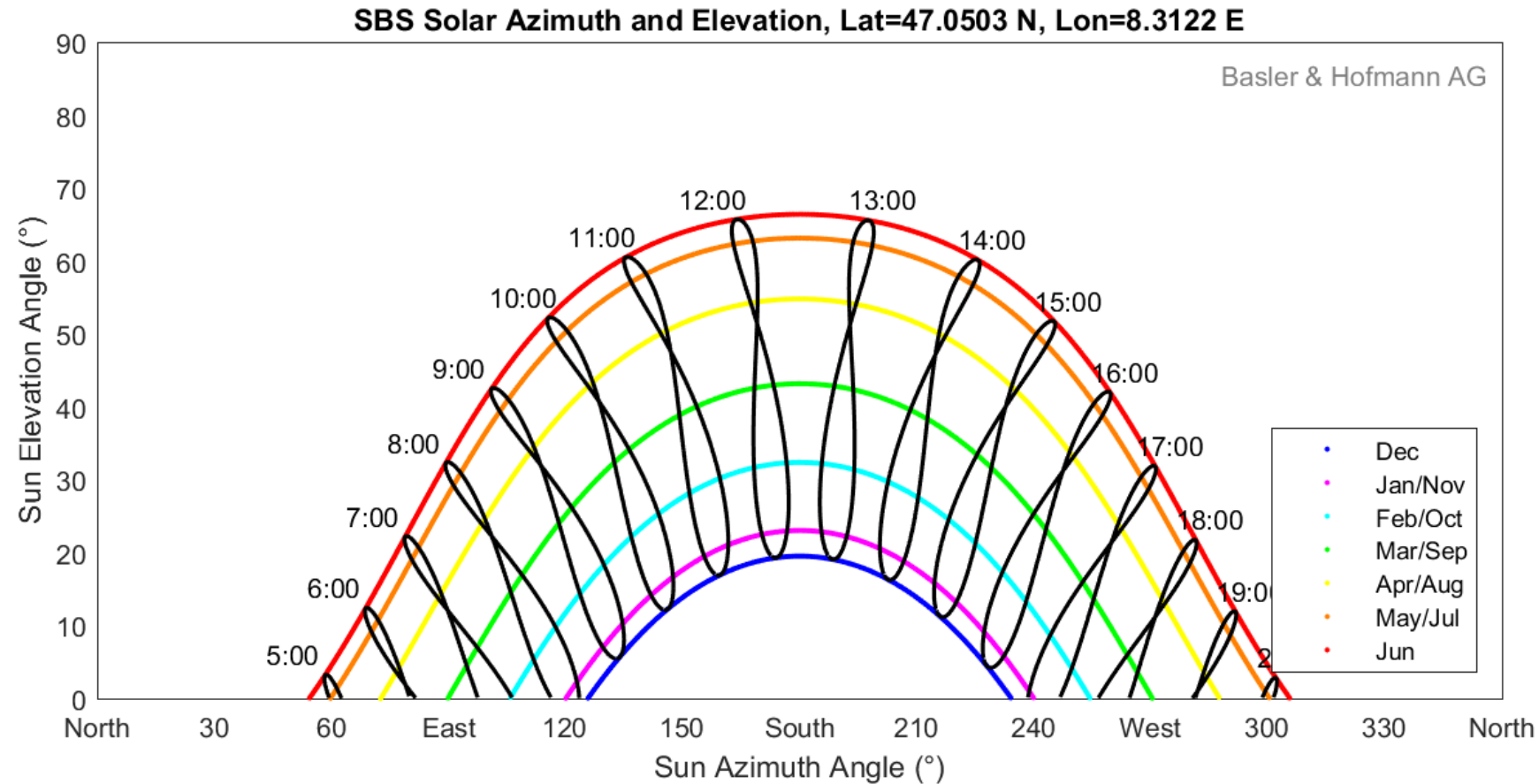
# Sonnenstands- und Reflexionsdiagramm

# Beispielsituationen



Abendliche Blendung an einer horizontalen Oberfläche:  
Die Sonne steht im Westen und blendet Richtung Osten.

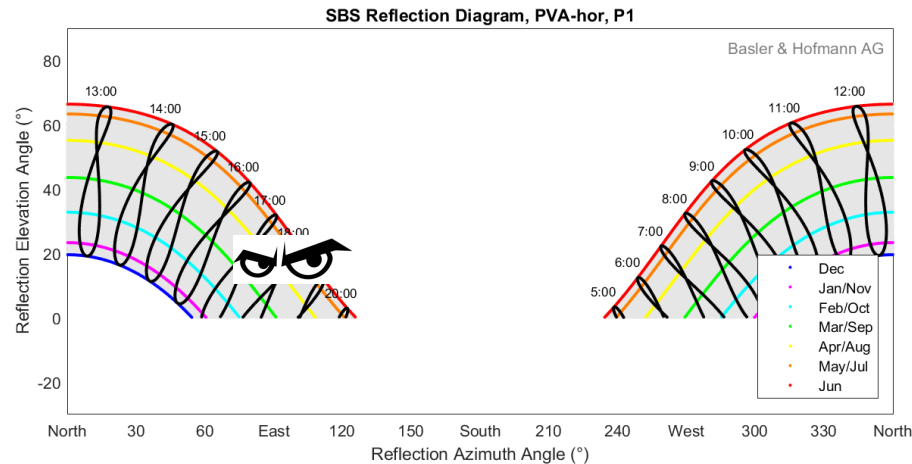
# Sonnenstandsdiagramm Schweiz (Luzern)



Sonnenstandsdiagramm Schweiz, Basler & Hofmann AG



# Das Reflexionsdiagramm

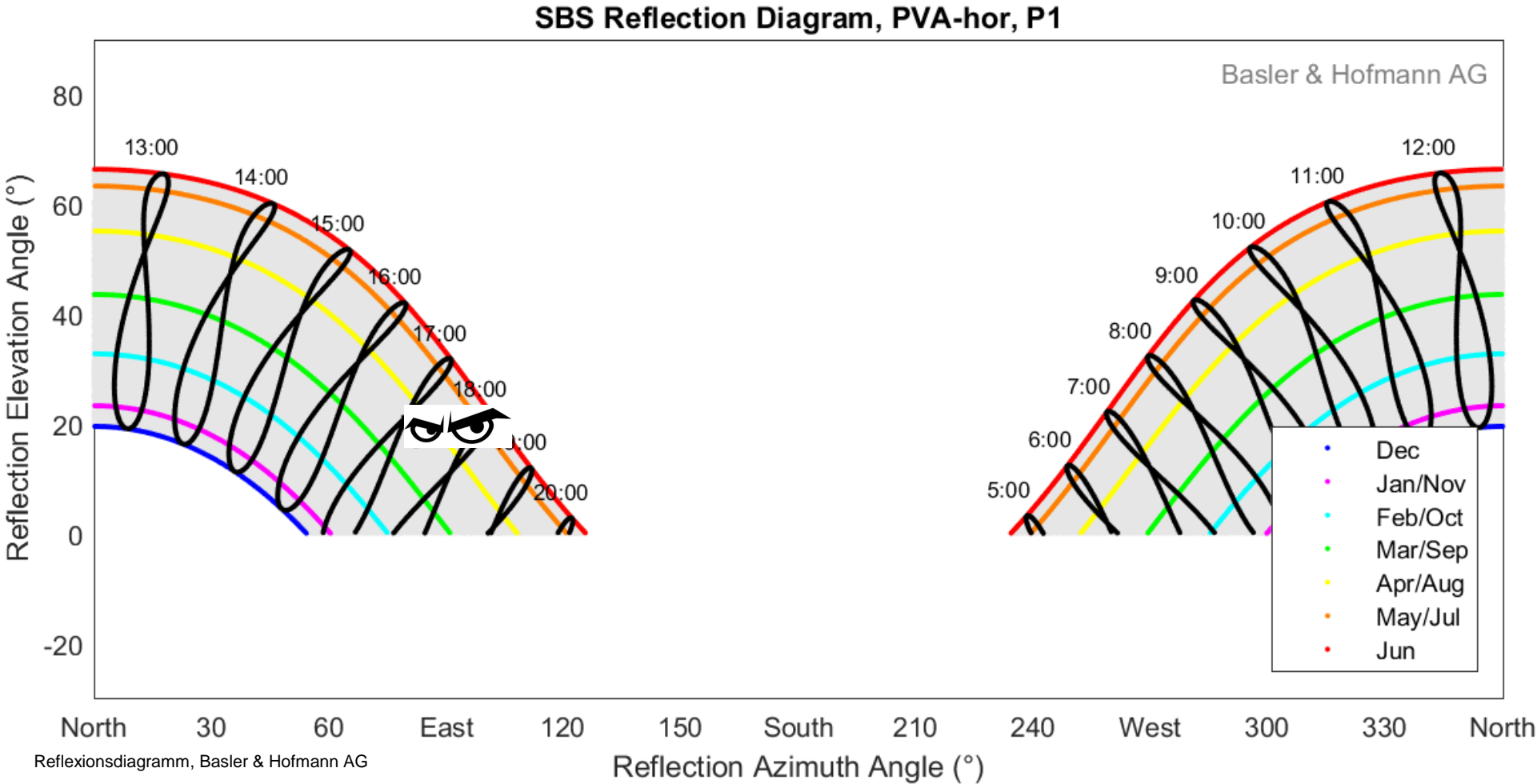


Reflexionsdiagramm, Basler & Hofmann AG

- Ist ein Winkeldiagramm
  - X-Achse: Azimutwinkel
  - Y-Achse: Elevationswinkel
- Zeigt den Reflexionsstrahl aus Sicht der reflektierenden Fläche
- Werden auf dem Reflexionsdiagramm Objekte (Beobachtungspunkte) eingezeichnet, so weist der Schnittpunkt zwischen Beobachtungspunkt und Reflexionsstrahl auf eine mögliche Blendung hin.

*Hinweis: Die folgenden Diagramme sind ohne Bündelaufweitung gerechnet. Die Bündelaufweitung wird im nächsten Kapitel diskutiert.*

# Reflexionsdiagramm horizontale Ebene



# Empfehlung zum Vorgehen

# Empfehlung zum Umgang mit möglichen Blendwirkungen in der PV-Planung

- Abschätzen, ob Blendung ein Problem sein könnte
- Falls nein (Grossteil aller Projekte): Keine Einschränkung bei der Modulwahl
- Falls ja:
  1. Simulation der Blendung mit [www.blendtool.ch](http://www.blendtool.ch)
  2. Beurteilen / einschätzen der Blendwirkung
  3. Falls die Blendwirkung als kritisch eingeschätzt wird:
    - Ermitteln des Lichteinfallswinkels während der Blendung (=Winkel, aus der der Beobachter auf die Moduloberfläche schaut)
    - Wahl eines PV-Moduls, das beim entsprechenden Winkel unterhalb des «Vorschlag blendfrei» liegt.