

WITECHWI-SYMPOSIUM „PHOTOVOLTAIK“

Bürgerhaus Schwalbach

14. September 2024

Heinz Werntges, Hochschule RheinMain

WiTechWi-Symposium am 14. September 2024 in Schwalbach/Ts.

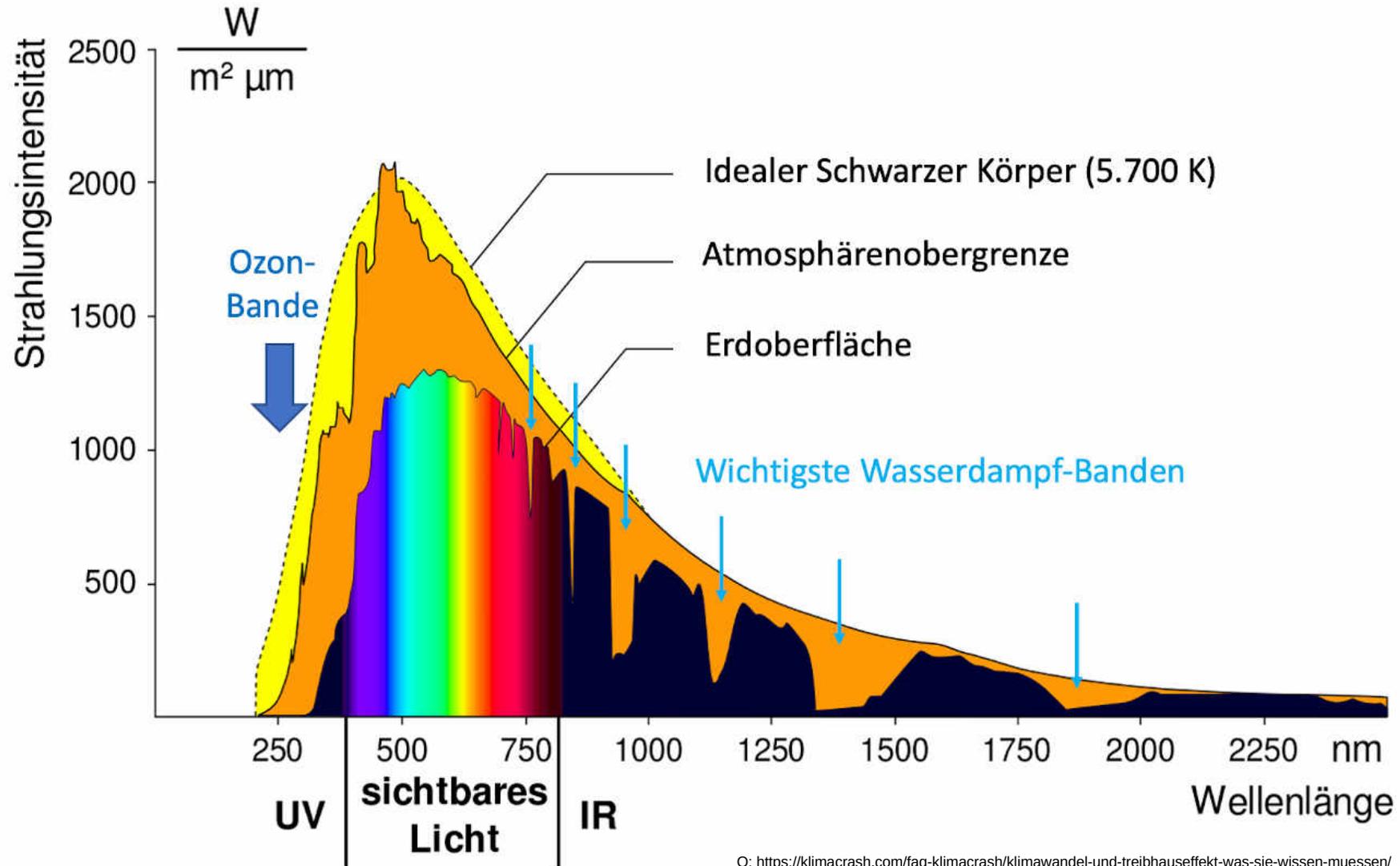
PHOTOVOLTAIK-GRUNDLAGEN

Jede gute Praxis benötigt ein solides
theoretisches Fundament...

Heinz Werntges, Hochschule RheinMain
WiTechWi-Symposium am 14. September 2024 in Schwalbach/Ts.

DIE ENERGIEQUELLE

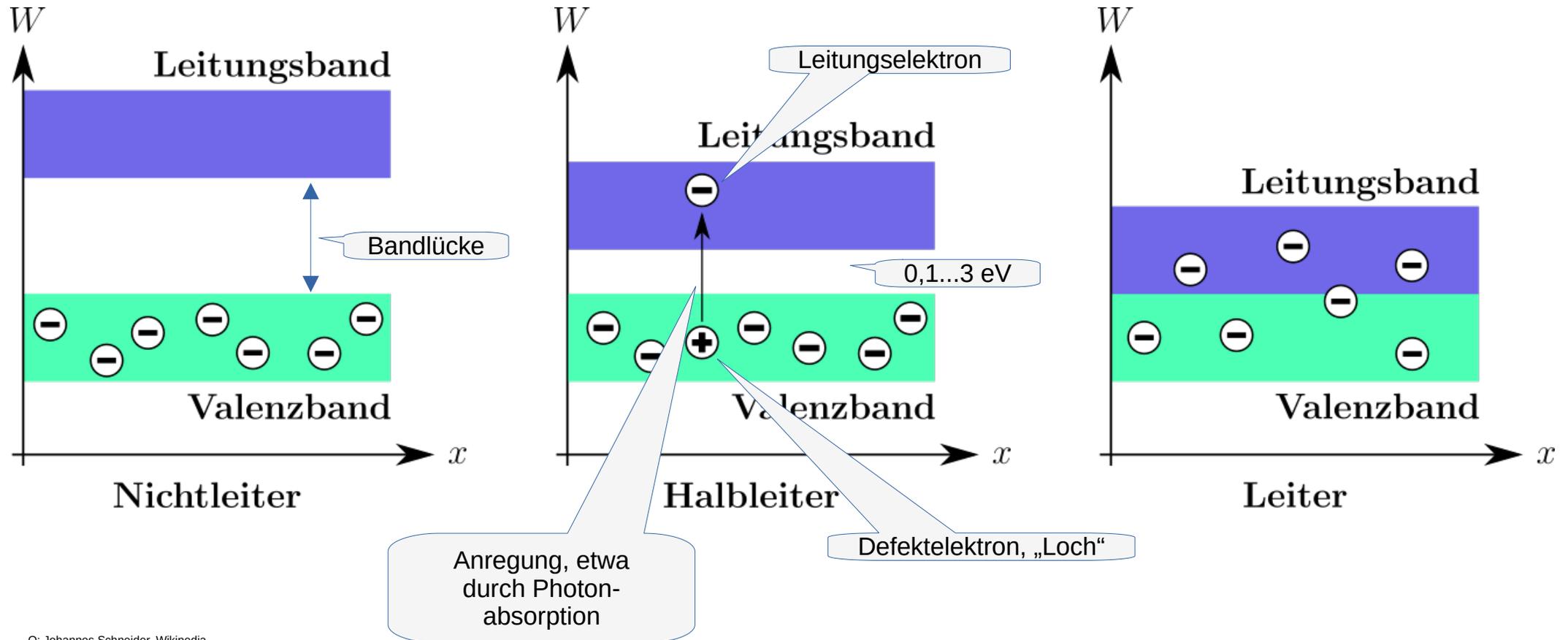
SONNENLICHT IN ERDBODEN-NÄHE



Q: <https://klimacrash.com/faq-klimacrash/klimawandel-und-treibhauseffekt-was-sie-wissen-muessen/>

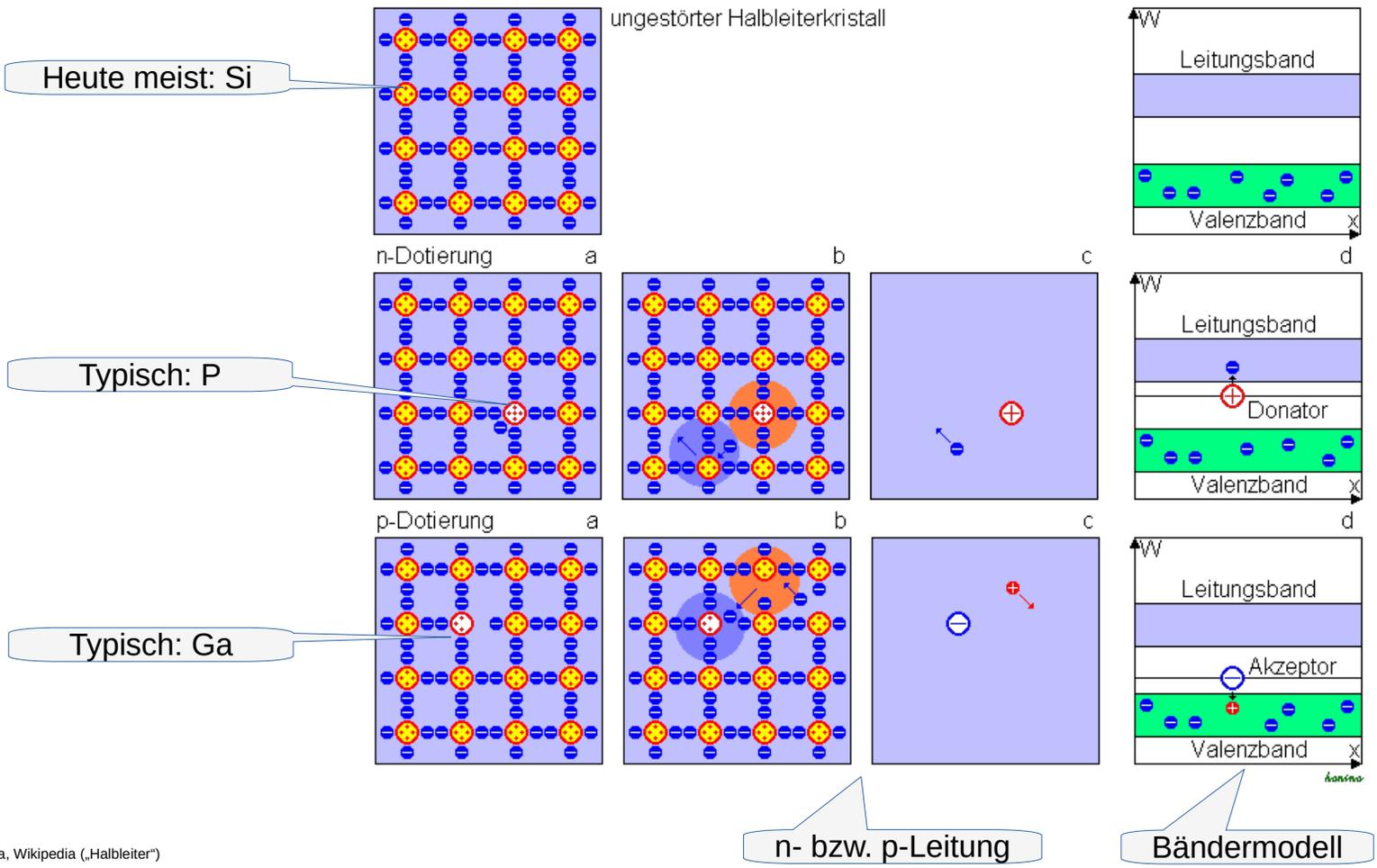
ETWAS HALBLEITER-WISSEN

DAS BÄNDERMODELL FÜR FESTKÖRPER



Q: Johannes Schneider, Wikipedia („Halbleiter“)

HALBLEITER, DOTIERUNG



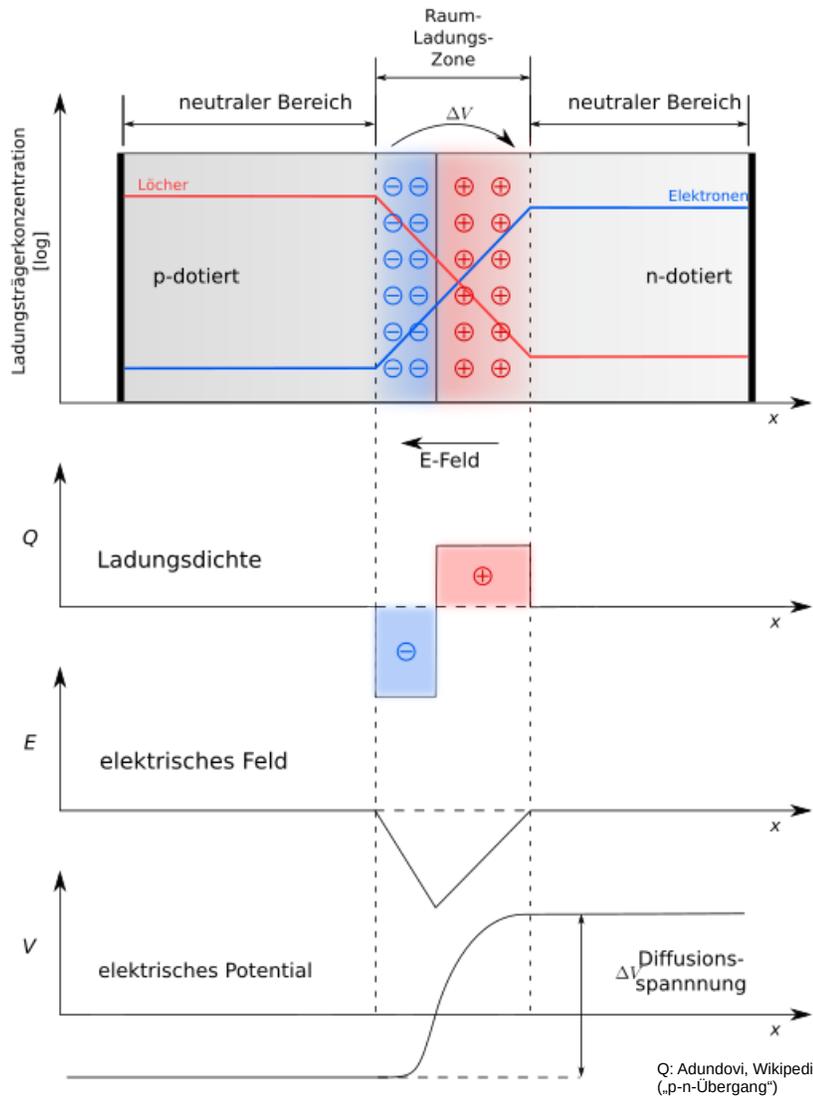
Starke Dotierung:
1 : 10⁴

Geringe Dotierung:
1 : 10⁶... 10⁷

Si muss demnach
zunächst hochrein
sein!

Q: Honina, Wikipedia („Halbleiter“)

P-N-ÜBERGANG, DIODE

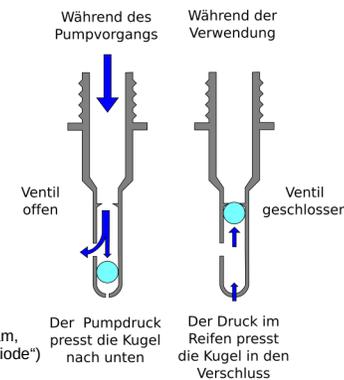


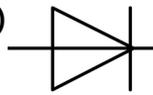
Elektronen und Löcher neutralisieren sich nahe der Grenzfläche.

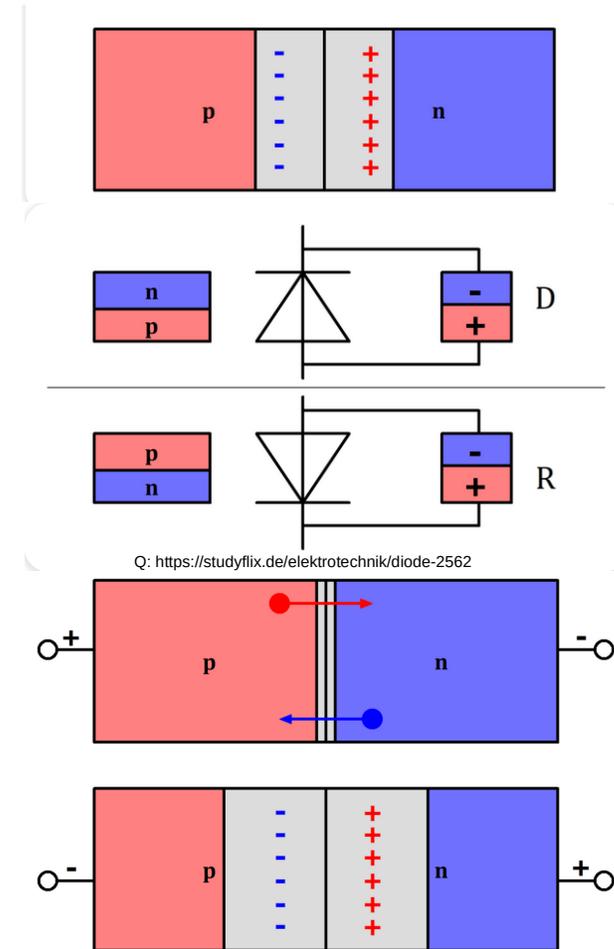
Es bildet sich eine dünne Schicht ohne freie Ladungsträger, in der Ionen der Dotierungsatome eine **Raumladungszone** erzeugen.

Beim Anlegen einer Spannung wird die Raumladungszone dünner bzw. dicker. Strom fließt nur in einer Richtung.

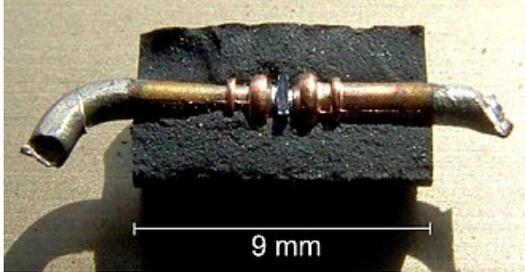
Die so entstehende Diode wirkt wie ein Rückschlagventil.



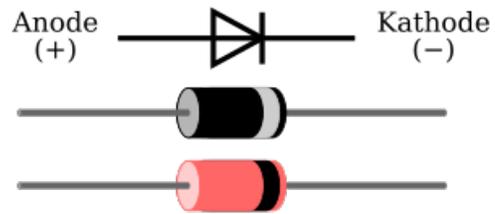
Anode (+)  (-) Kathode



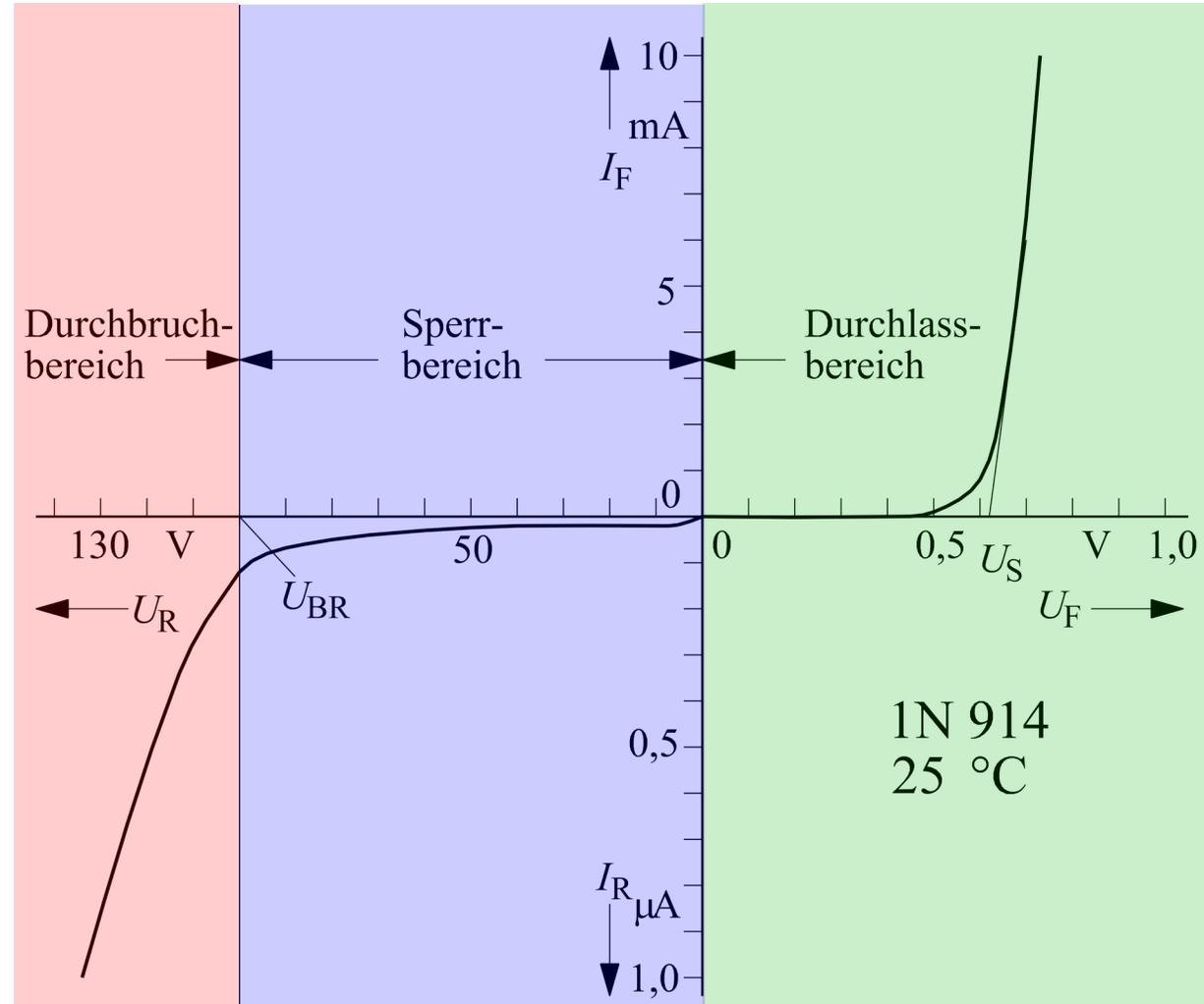
DIE HALBLEITER-DIODE



Q: Laeman, Wikipedia („Diode“)



Q: Erik Streb, Wikipedia („Diode“)



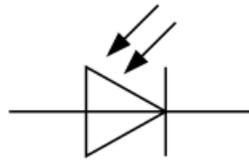
Q: Saure, Wikipedia („Diode“)

In Durchlassrichtung muss erst die Diffusionsspannung überwunden werden (Abbau der Diffusionszone), dann fließt Strom.

In Sperr-Richtung vergrößert sich die isolierende Raumladungszone. Es fließt fast kein Strom, bis zur Materialzerstörung.

SOLARZELLEN

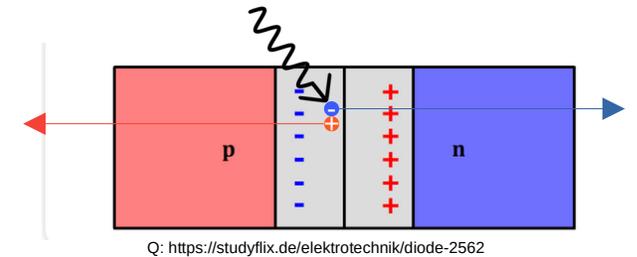
PHOTODIODE UND SOLARZELLE



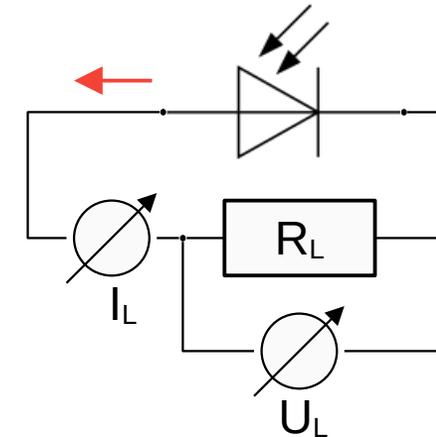
Q: MovGP0, Wikipedia („Photodiode“)

Was passiert, wenn ein Photon auf eine Diode trifft?

- Es entsteht ein Elektron-Loch-Paar
- Dieses wandert umher, bis es rekombiniert (Verlust) oder die Raumladungszone erreicht, wo es getrennt wird
- Dann fließt ein Strom bzw. entsteht eine Spannung an den Polen!
- Dieser Strom fließt in Sperr-Richtung!
- Bekannte Grenzfälle:
 - Ohne Lastwiderstand ($R_L = \infty$): $U_L = \text{Leerlaufspannung}$, $I_L = 0$
 - Bei Kurzschluss ($R_L = 0$): $I_L = \text{Kurzschluss-Strom}$, $U_L = 0$

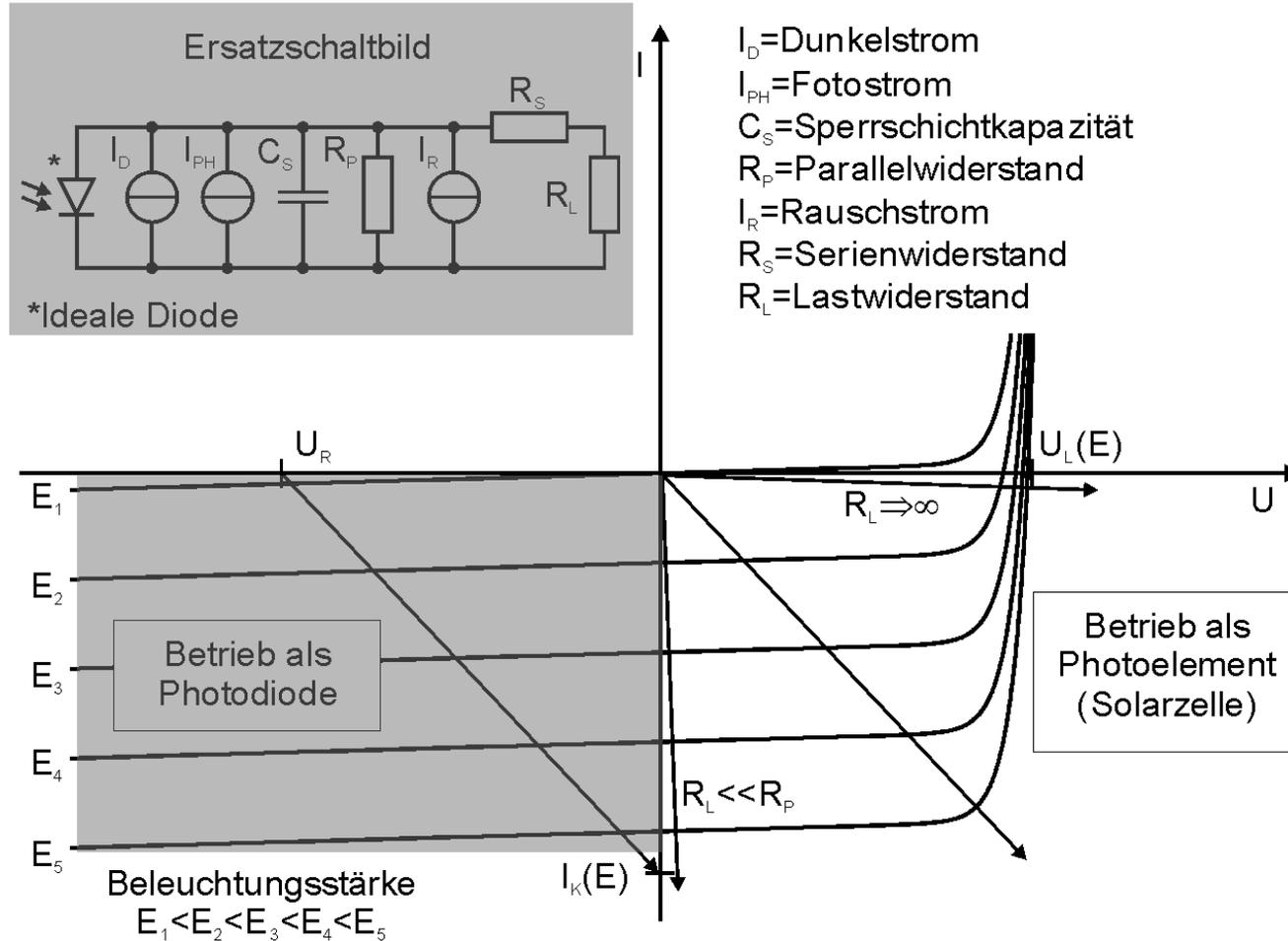
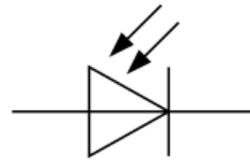


Q: <https://studyliflix.de/elektrotechnik/diode-2562>



Q: Eigene Zeichnung

PHOTODIODE UND SOLARZELLE



Ohne Beleuchtung (E_1) ist die Kennlinie die einer normalen Diode.

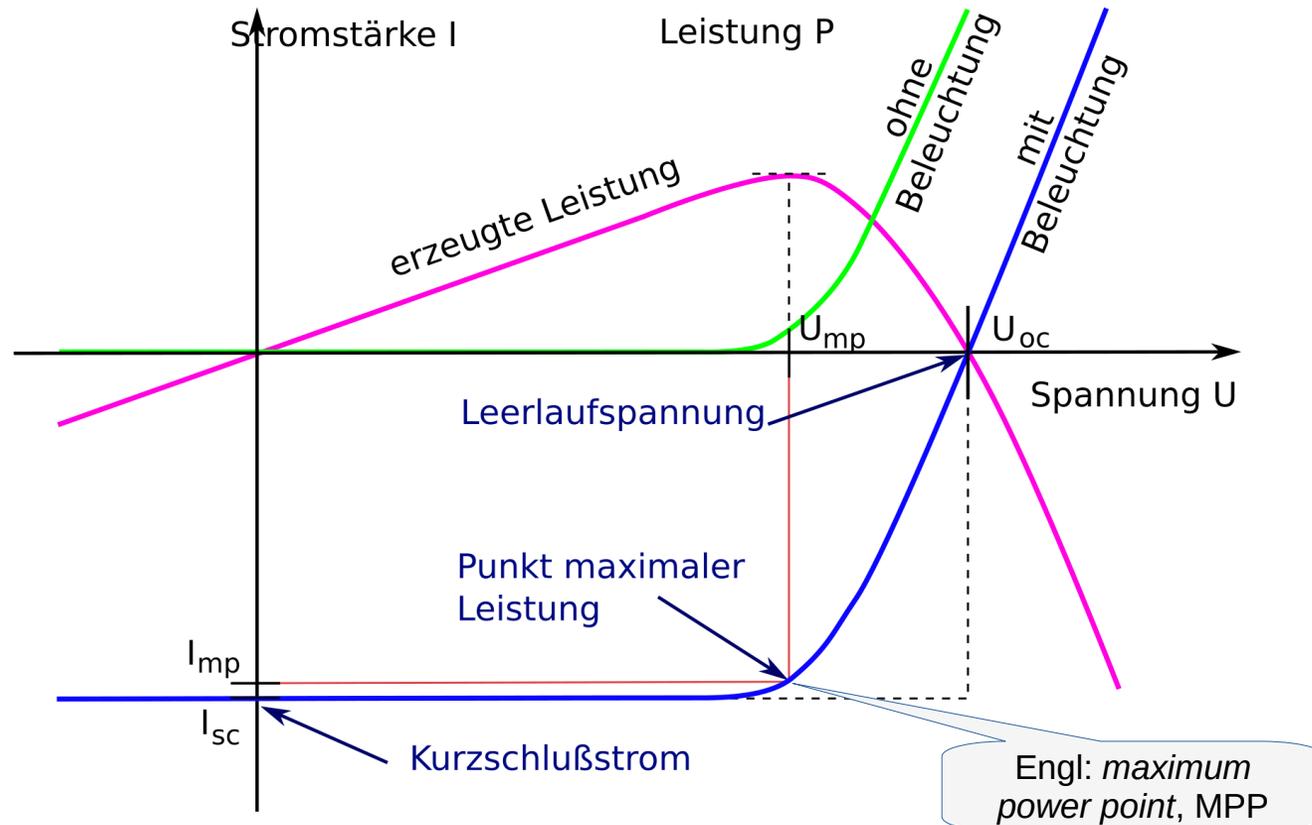
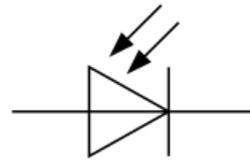
Schließt man die Solarzelle kurz, fließt ein Strom proportional zur Beleuchtung ($R_L=0$, $R_L \ll R_P$).

Die Spannung U_L hängt bei großem R_L ($R_L \Rightarrow \infty$) nur wenig von der Beleuchtung ab)

Die Leistung $P=U_L \cdot I_L$ ist an den Extremwerten 0. Sie wird bei einem Widerstand R_{MPP} maximal!

Q: Gregor Hess, Wikipedia („Photodiode“)

PHOTODIODE UND SOLARZELLE

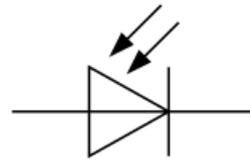


Die Leistung $P=U_L \cdot I_L$ ist an den Extremwerten 0. Sie wird bei einem Widerstand R_{MPP} maximal!

Diesen Lastwiderstand sollten Solar-Wechselrichter stets einstellen, um die optimale Leistung P_{MPP} zu erzielen.

Die Ermittlung von P_{MPP} muss ständig erfolgen, z.B. wegen Verschattung. Sie kann bei Modulsträngen kompliziert werden (Neben-Minima!).

PHOTODIODE UND SOLARZELLE

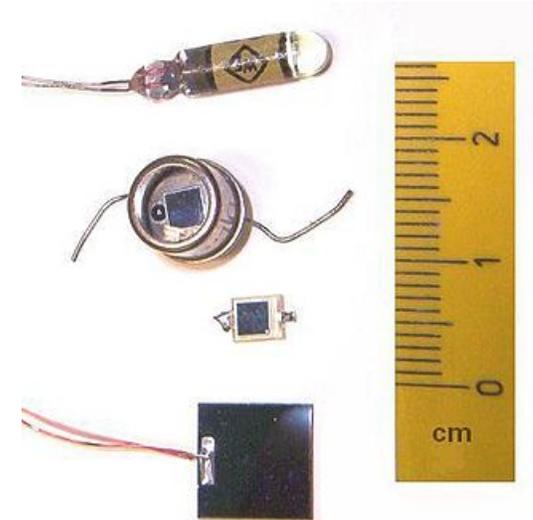


Photodiode

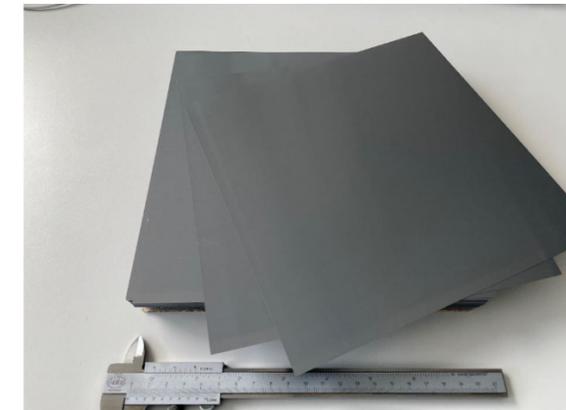
- Diode wird als großflächiges, dünnes Plättchen ausgeführt
- Dotierungen so, dass die Ladungstrennung häufig passiert
- Kontaktierung möglichst gut leitend, aber auch mit minimaler Verschattung

Solarzelle

- Der gesamte Wafer ist eine einzige großflächige Diode/Solarzelle
- Die Dicke liegt bei 200 μm
- „Halbzelle“: Aufteilung eines quadratischen Wafers in 2 Hälften
- Solarmodul: Reihenschaltung vieler Solarzellen

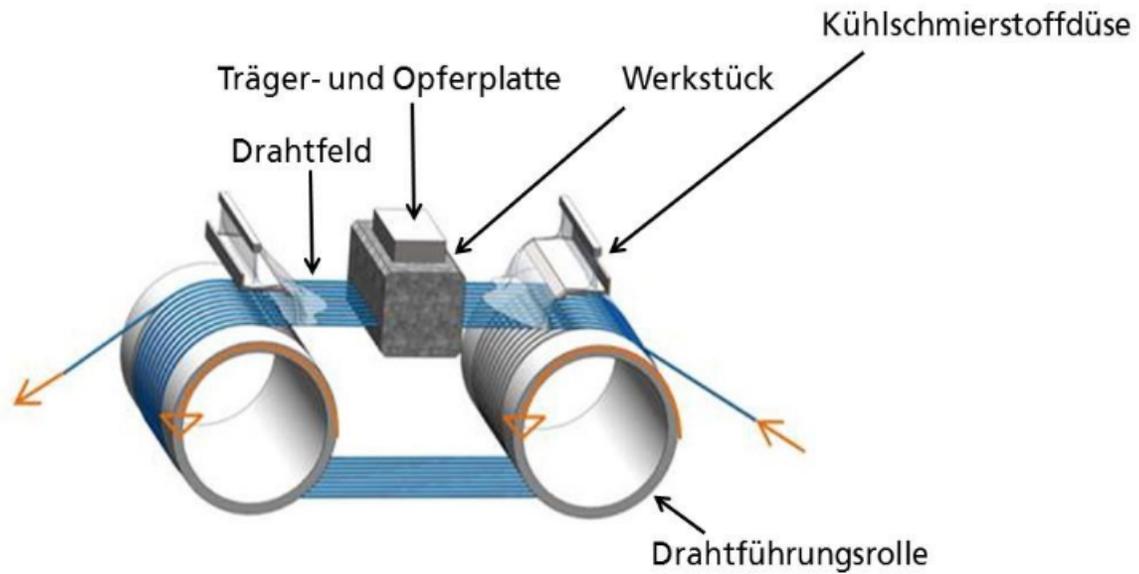


Q: Ulfbastel, Wikipedia („Photodiode“)



Wafer im Format G12 / 210x210 mm², hergestellt am Fraunhofer CSP.

HERSTELLUNG DER WAFER



Grundprinzip des Vieldrahtsägens.

Ca. 4000 Wafer pro Schnitt. 1-m-Block, Draht- ϕ 45-50 μm

Q: Fraunhofer CSP, Halle. Silizium: Vom Material zum Wafer – Status und notwendige Entwicklungsschritte (beide)

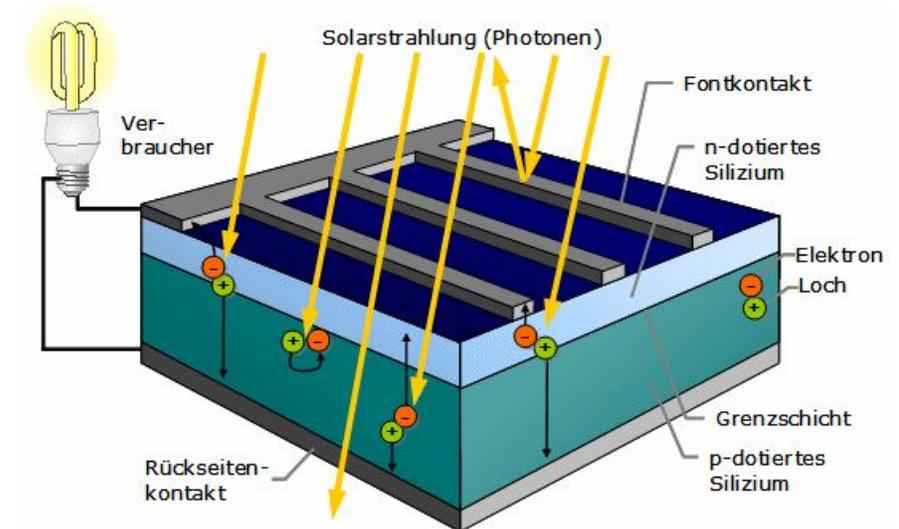


Verlust-Wege

- Reflexion, z.B. am Frontkontakt oder Schutzglas
- Transmission / Absorption von Rückseiten-Kontakt
- Rekombination
- Thermische Verluste (Elektron „zu schnell“)

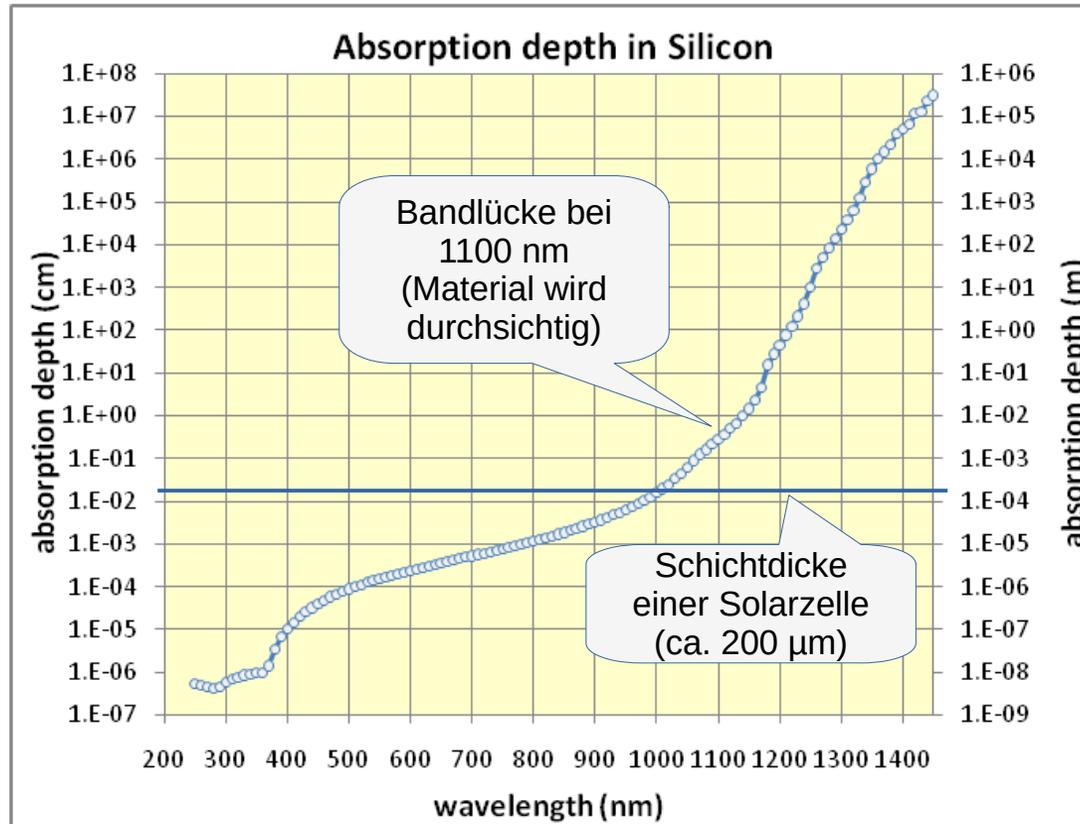
Abhilfen

- Sehr dünne und/oder transparente Frontkontakte
- Reflektierende Rückseiten-Kontakte bzw. -Folie
- Geringe Schichtdicke, minimiert Weg zur Raumladungszone
- Antireflex-Beschichtung des Deckglases
- Dotierungs-Tricks...
- Tandem-Zellen (s.u.)



Q: <https://www.elektrotechnikhubrig.de/grundlagen-zur-photovoltaik/>

WIRKUNGSRADE

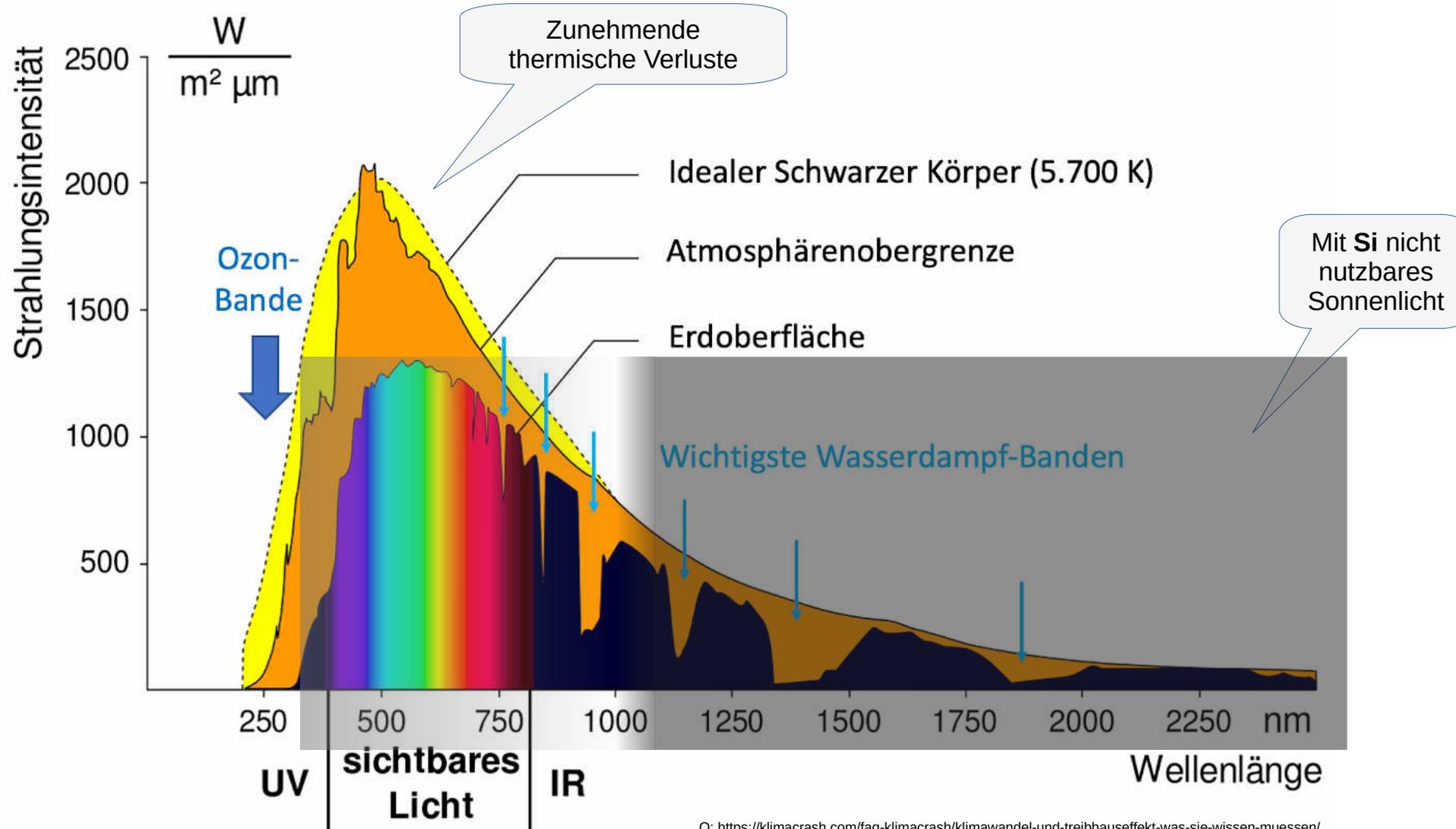


Si erscheint schwarz:

- Vollständige Absorption bis fast 1000 nm
- Transparent erst > 1100 nm (IR)
- Dazwischen Übergangszone

Q: <https://www.pveducation.org/pvcdrrom/materials/optical-properties-of-silicon>

SONNENLICHT UND ABSORPTION IN SI



Q: <https://klimacrash.com/faq-klimacrash/klimawandel-und-treibhauseffekt-was-sie-wissen-muessen/>

Zum Vergleich: Heute marktgängige Si-Zellen

- Monokristalline Zellen: Kommerzielle Modul-Wirkungsgrade typisch **18 – 22%** (polykristallin 13-17%)

Tandemzellen

- Stapel aus 2-4 Schichten unterschiedlicher Halbleiter, optimiert für *mehrere* Spektralbereiche
- Sehr teuer in der Herstellung, daher meist mit Licht-Konzentratoren kombiniert

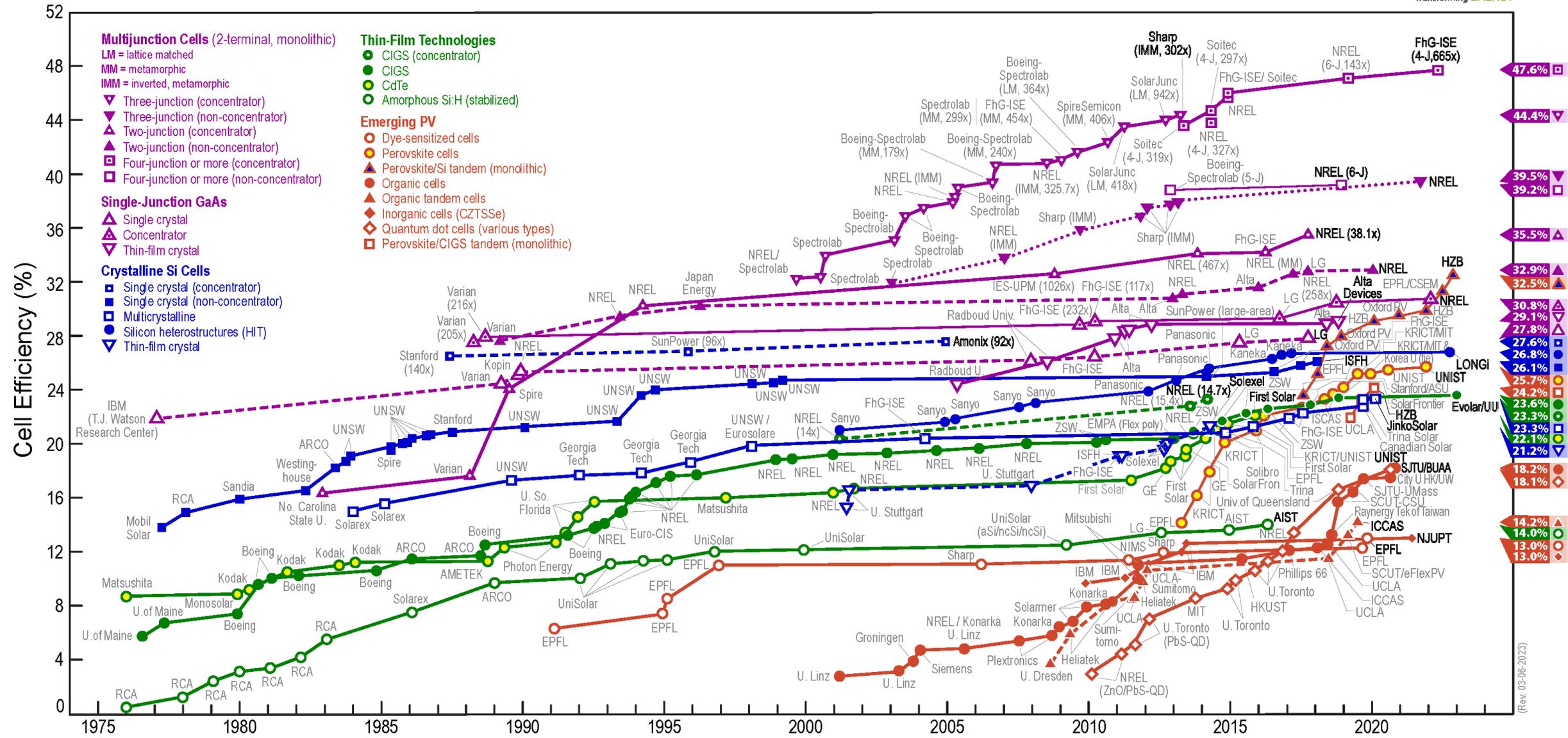
Andere Materialien

- Perowskit (CaTiO_3), GaAs, organische Farbstoffe, ...
- Noch viel Entwicklungsarbeit (Lebensdauer, Effizienz, Herstellungskosten...)

Dünnschicht-Zellen

- Energetischer Wirkungsgrad der Herstellung sehr gut (keine aufwändige Schmelze)
- Biegsame und leichte Module erschließen neue Anwendungsfelder

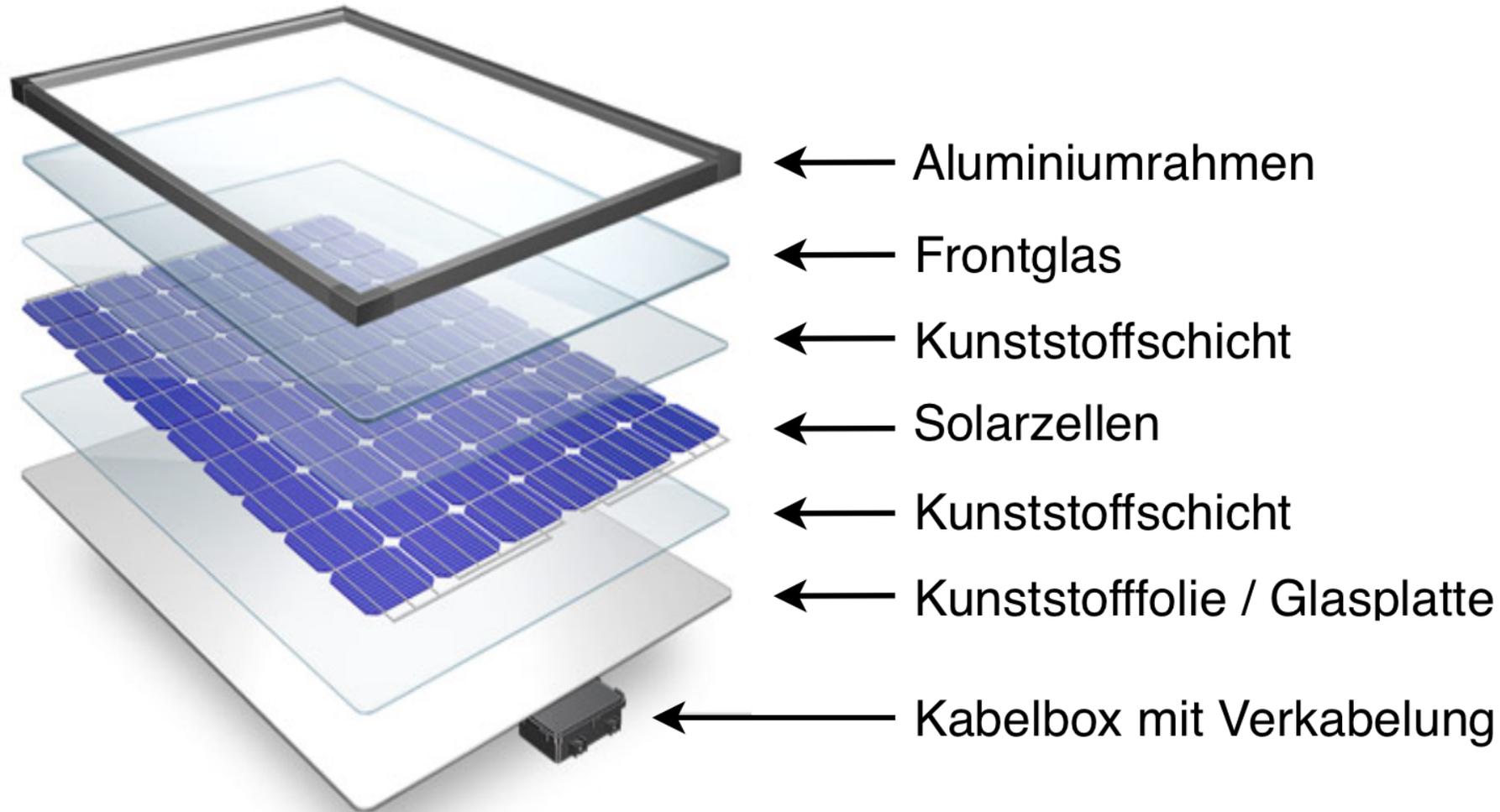
Best Research-Cell Efficiencies



Q: NREL, Wikipedia („Solarzelle“)

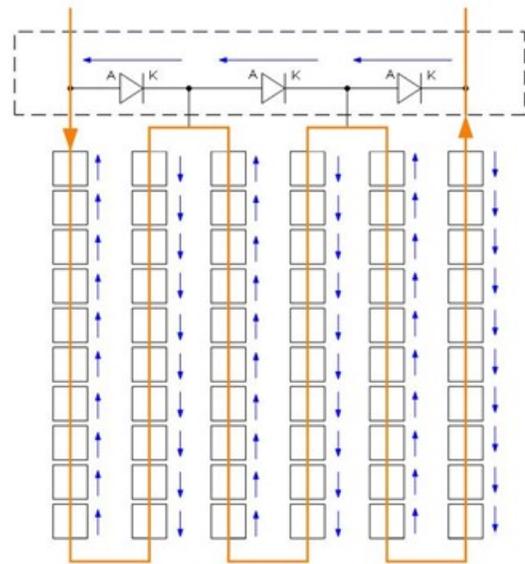
SOLARMODULE

AUFBAU EINES SOLARMODULS



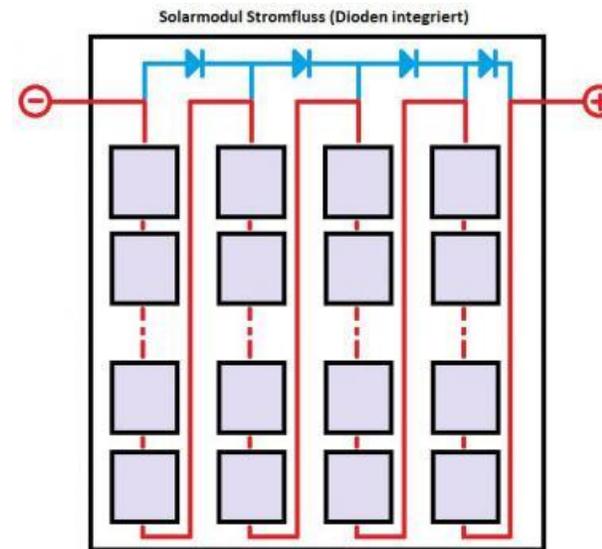
Q: solaranlagen-magazin.de / Enpal

REIHENSCHALTUNG UND BYPASS-DIODEN



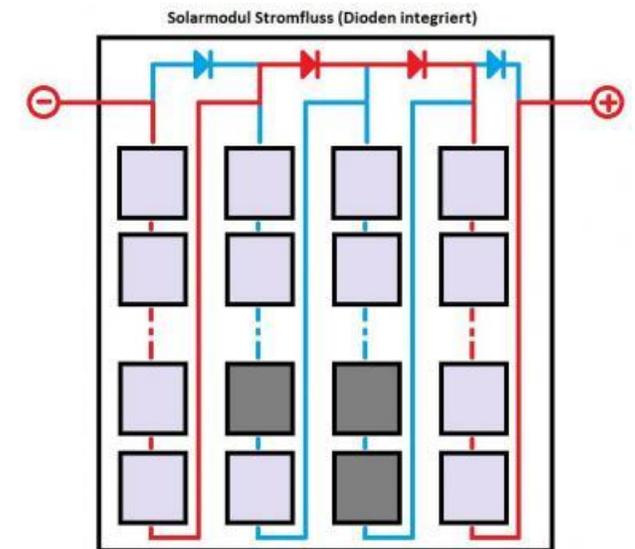
Stromfluss durch unverschattetes Solarmodul. Alle Bypassdioden sperren da die Spannungen an den Kathoden größer ist als die Spannung an den Anoden.

Bild 4 Teilverschattung - Teil 1@photovoltaikbuero.de



■ Solarzelle
■ Stromfluss
■ verschmutzte / verschattete Zelle
- - - weitere Solarzellen

[c] Wohnen-Heimwerken.de



■ Solarzelle
■ Stromfluss
■ verschmutzte / verschattete Zelle
- - - weitere Solarzellen

[c] Wohnen-Heimwerken.de

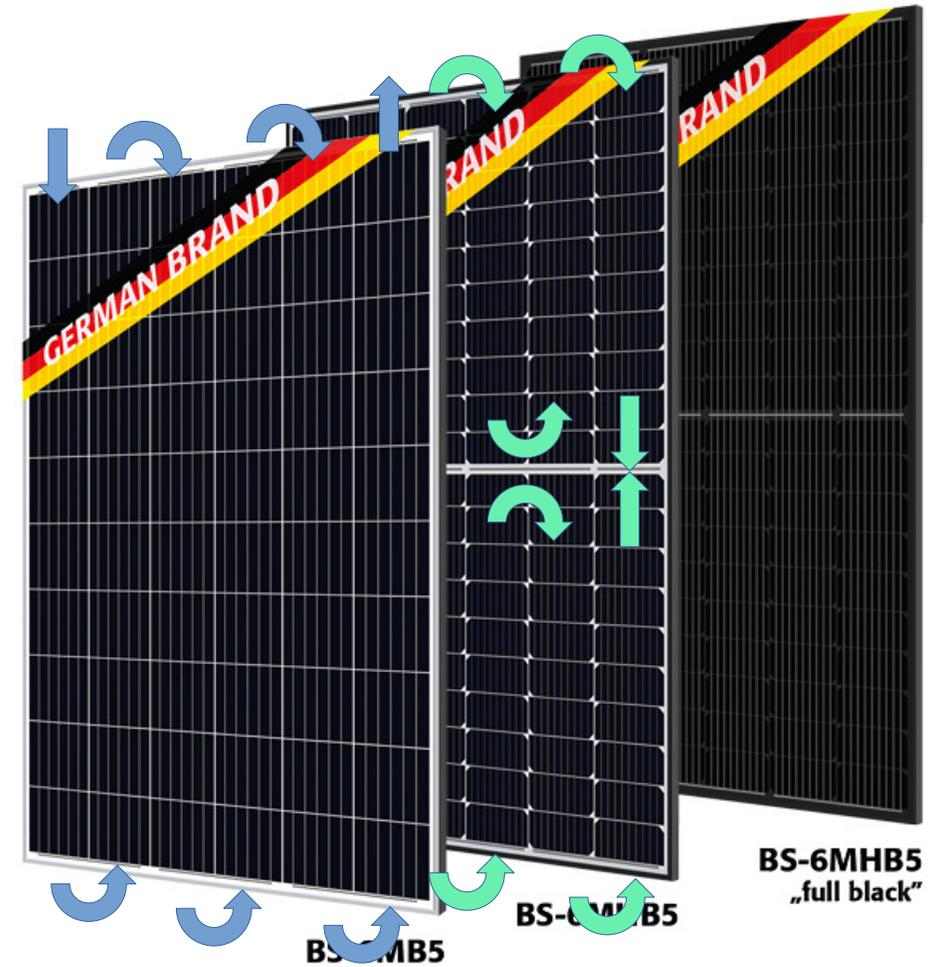
Q: photovoltaikbuero.de (links), wohnen-heimwerken.de (rechts)

Standard-Modul

- Quadratische Zellen, hier: 6 x 10 Zellen, alle in Reihe
- Abschätzung Betriebsspannung: $60 * 0,7 \text{ V} = 42 \text{ V}$
- Anschlüsse und Bypass-Dioden oben

Halbzellen-Modul

- Rechteck-Zellen, hier: 6 x 10 x 2 Halbzellen
- Obere und untere Hälfte jeweils in Reihe,
- Beide Hälften parallel \Rightarrow Abschattung einer Hälfte reduziert Leistung nur auf die Hälfte
- Anschlüsse und Bypass-Dioden mittig
- Axitech-Modul: 6 x 9 Halbzellen pro Hälfte, $54 * 0,7 \text{ V} = 37,8 \text{ V}$



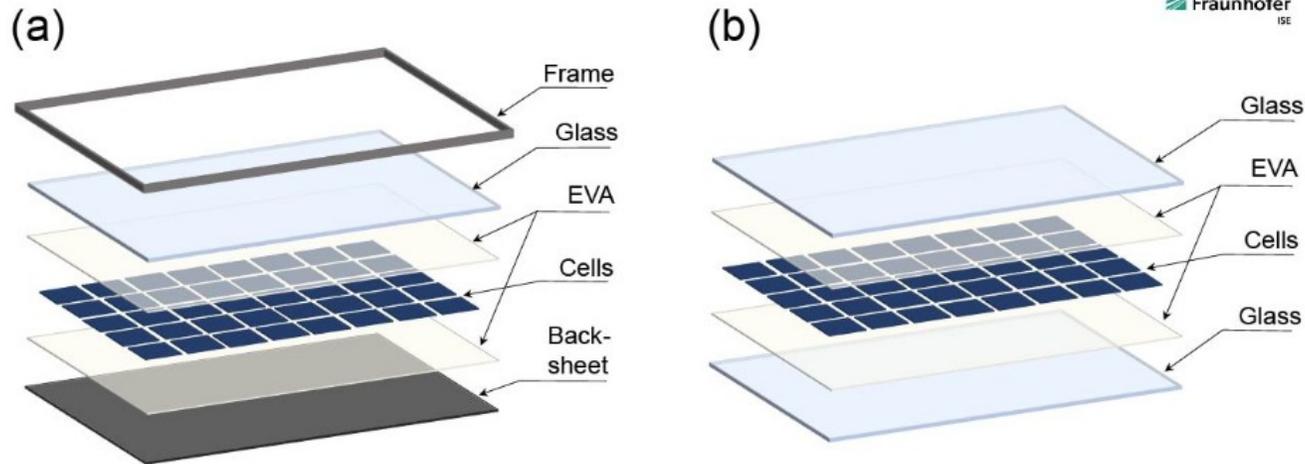
Q: Bauer Solar / photovoltaik.eu

ZELLEN-TYPEN

Monokristallin (schwarz, blau), polykristallin

Module:

(a) Glas-Folie, (b) Glas-Glas, ggf. bifazial

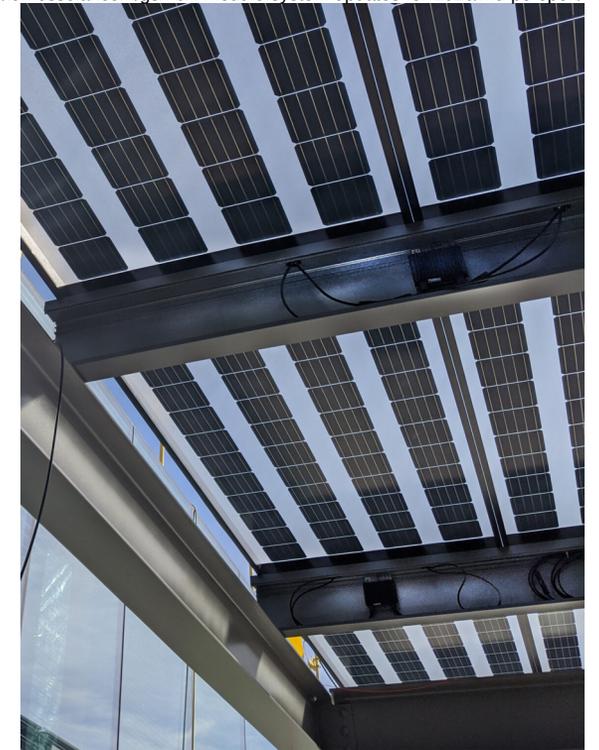


Q: Fraunhofer ISE

Q: <https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/solarmodule>



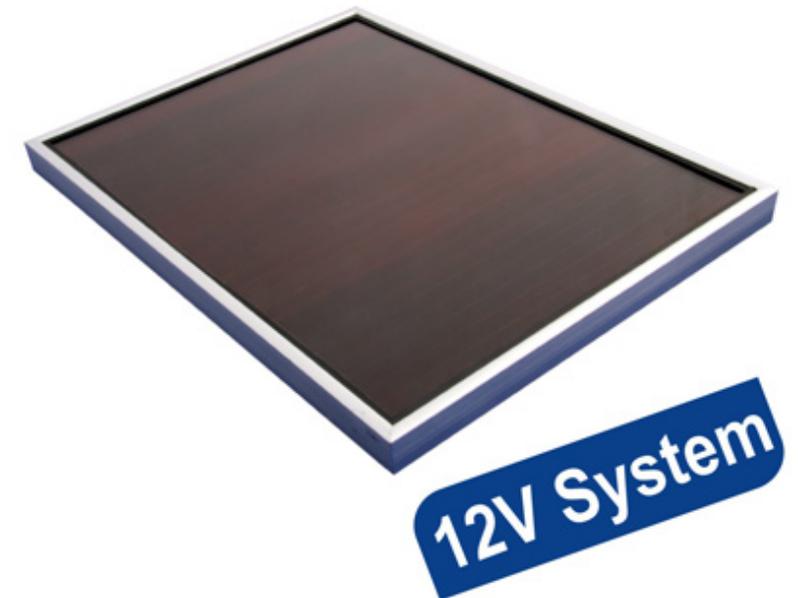
Q: <https://lumossolar.com/gsx-bifi-module-system-updates-for-2020/md-pe-open/>



ZELLEN-TYPEN: DÜNNSCICHT-MODULE, AMORPHE ZELLEN



<https://www.ective.de>, MSP 100 flex



Q: <http://www.garten-anlegen.eu/solar-shop/solarmodul-amorph/index.html>

ZELLEN-TYPEN: PVT (PV-THERMISCH)



Q: <https://northburnsolar.co.uk/solarpanels/solarpvt/solarpvt.html>