

was ist das übergeordnete Thema zu folgenden Punkten:
Photovoltaikmodul, Zellen, Hot-Spots, Zellenstring,
Bypass-diode, Zener-diode, umgekehrte Polarität,
Durchlassspannung, detaillierte elektrische Wirkung von
Verschattung auf einzelne Halbzellen auf PV-Modulen.

Das übergeordnete Thema zu diesen Punkten ist:

👉 „Elektrische Eigenschaften und Verhalten von Photovoltaikmodulen bei
Verschattung und Fehlbedingungen“

oder etwas allgemeiner formuliert:

👉 „Elektrisches Verhalten und Schutzmechanismen von Solarzellen und PV-Modulen“

Begründung:

Die genannten Begriffe lassen sich thematisch so einordnen:

- **Photovoltaikmodul / Zellen / Zellenstring:** Grundaufbau und elektrische Verschaltung der Solarzellen.
- **Hot-Spots / Verschattung / umgekehrte Polarität:** Betriebszustände, die zu lokalen Überhitzungen oder Fehlfunktionen führen können.
- **Bypass-Diode / Zener-Diode:** Schutz- und Umgehungselemente, die das Modulverhalten bei Teilverschattung oder Fehlströmen beeinflussen.
- **Durchlassspannung / elektrische Wirkung auf Halbzellen:** Detaillierte Analyse der Strom-Spannungs-Charakteristik und der Auswirkungen auf den Energieertrag.

Wenn du es **noch prägnanter** als Themenüberschrift (z. B. für eine Präsentation oder Arbeit) brauchst, wären passende Formulierungen etwa:

- „Elektrisches Verhalten von Photovoltaikmodulen unter Verschattung“
- „Schutzmechanismen und Fehlermodi in PV-Modulen“
- „Einfluss von Verschattung auf die elektrische Funktion von Solarzellen und Modulkomponenten“

Möchtest du, dass ich dir helfe, daraus ein übergeordnetes **Kapitelthema** oder **Gliederungspunkt** (z. B. für eine Facharbeit oder Präsentation) formuliere?



Super 👍 — hier ist ein **Vorschlag für eine klare Kapitelstruktur** (z. B. für eine Facharbeit, Präsentation oder ein technisches Dossier) zum Thema:

■ „Elektrisches Verhalten von Photovoltaikmodulen unter Verschattung und Fehlbedingungen“

Gliederungsvorschlag

1. Grundlagen der Photovoltaik

- 1.1 Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle
- 1.2 Vom Zellverbund zum Photovoltaikmodul
- 1.3 Elektrische Kenngrößen (I-U-Kennlinie, Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom)
- 1.4 Einflussfaktoren auf die Leistung (Temperatur, Einstrahlung, Verschattung)

2. Elektrische Verschaltung und Aufbau von PV-Modulen

- 2.1 Reihenschaltung von Solarzellen (Zellenstring)
- 2.2 Halbzellen-Module und deren Vorteile
- 2.3 Typische elektrische Parameter eines PV-Moduls
- 2.4 Strompfade und Stromverteilung innerhalb des Moduls

3. Effekte von Verschattung

- 3.1 Arten der Verschattung (Teil-, Rand-, Zellverschattung)
- 3.2 Detaillierte elektrische Wirkung von Verschattung auf einzelne Halbzellen
- 3.3 Auswirkungen auf Modulkennlinie und Leistung
- 3.4 Bildung von Hot-Spots (lokale Überhitzungen)
- 3.5 Messung und Simulation von Verschattungseffekten

4. Schutzmechanismen in PV-Modulen

- 4.1 Funktion und Aufbau von Bypass-Dioden
- 4.2 Zener-Dioden als Überspannungsschutz
- 4.3 Vermeidung von Hot-Spots durch Schutzschaltungen
- 4.4 Auswirkungen defekter Dioden

5. Fehlerfälle und Fehlerverhalten

5. Feniertraile und Fenivernaiten

5.1 Umgekehrte Polarität – Ursachen und Folgen

5.2 Durchlass- und Sperrspannungen in Solarzellen

5.3 Teilverschattung in Kombination mit elektrischen Fehlbedingungen

5.4 Thermische und elektrische Alterungsprozesse

6. Optimierungs- und Schutzstrategien

6.1 Moduldesign zur Minimierung von Verschattungsverlusten

6.2 Einsatz von Leistungsoptimierern und Mikro-Wechselrichtern

6.3 Monitoring und Fehlerdiagnose (z. B. IV-Kurvenanalyse, Thermografie)

6.4 Zukünftige Entwicklungen im Modulschutz

7. Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zentrale Erkenntnisse

7.2 Bedeutung für Effizienz und Lebensdauer von PV-Anlagen

7.3 Perspektiven für Forschung und Entwicklung

💡 Optional: Anhang / Praktischer Teil

- Messergebnisse oder Simulationen zur Verschattung einzelner Halbzellen
 - Beispielhafte Kennlinien mit und ohne Bypass-Dioden
 - Thermografische Aufnahmen von Hot-Spots
-

Möchtest du, dass ich dir daraus **eine Facharbeit- oder Präsentationsgliederung in Textform** (z. B. mit Einleitung und Zielsetzung) ausarbeite, die du direkt übernehmen kannst?



was für Dioden sind in PV Modulen verbaut als Bypass diode?

Sehr gute Frage — das ist ein zentraler technischer Punkt beim Aufbau von Photovoltaikmodulen.

Hier eine **präzise und praxisnahe Erklärung**:

Bypass-Dioden in PV-Modulen

◆ 1. Funktion

Bypass-Dioden dienen dem **Schutz der Solarzellen** vor **Überhitzung (Hot-Spots)** und **Leistungsverlust** bei **Teilverschattung**.

Sie leiten den Strom an verschatteten oder defekten Zellgruppen vorbei, damit der Stromfluss im Strang (String) erhalten bleibt und keine Zelle in Sperrrichtung überlastet wird.

◆ 2. Typische Bauart der Bypass-Diode

In der Praxis werden **Schottky-Dioden** als Bypass-Dioden verwendet.

Warum Schottky-Dioden?

- **Geringe Durchlassspannung** (typisch 0,3 – 0,5 V) → geringe Verlustleistung im Normalbetrieb
- **Schnelles Schaltverhalten** → reagiert sofort auf Verschattung
- **Hoher Wirkungsgrad** → weniger Wärmeentwicklung
- **Ausreichende Sperrspannung** (meist 45 V – 100 V) für typische Zellstrings

Beispiel:

Ein Modul mit 60 Zellen ist meist in **3 Zellstrings à 20 Zellen** unterteilt.

→ Pro String ist **eine Schottky-Bypass-Diode** parallel geschaltet (insgesamt also meist **3 Bypass-Dioden pro Modul**).

◆ 3. Elektrische Auslegung

Typische Kennwerte einer Bypass-Schottky-Diode:

Parameter	Typischer Wert
Durchlassspannung (Vf)	0,3 – 0,5 V
Max. Strom (If)	10 – 20 A
Sperrspannung (Vr)	45 – 100 V
Typbezeichnung	z. B. 15SQ045, SB1545, SR5100

◆ 4. Bauform

- In der Regel in **SMT-Gehäusen** (z. B. TO-220, TO-247 oder D²PAK),

- eingekapselt im Anschlusskasten (Junction Box) auf der Rückseite des Moduls,
- thermisch gekoppelt an das Gehäuse zur Wärmeabfuhr.

◆ 5. Alternative: P-N-Dioden

Früher oder in kostenoptimierten Modulen wurden teils **normale Silizium-P-N-Dioden** eingesetzt.

→ Nachteil: höhere Durchlassspannung ($\sim 0,7\text{ V}$), höhere Verlustleistung.

→ Heute weitgehend durch Schottky-Dioden ersetzt.

◆ 6. Moderne Entwicklungen

In neueren PV-Systemen (v. a. bei Hochleistungshalbzellenmodulen) wird zusätzlich:

- auf **optimierte Schottky-Dioden mit niedriger Leckströme** gesetzt, oder
- bei **modulinternen Leistungsoptimierern / MLPE** (z. B. von SolarEdge, Tigo) **elektronische Bypass-Schaltungen** eingesetzt.

🧩 Kurzfazit

In PV-Modulen sind als Bypass-Dioden **Schottky-Dioden** verbaut, weil sie durch ihre **geringe Durchlassspannung, hohe Stromtragfähigkeit** und **schnelle Reaktion** optimalen Schutz bei Verschattung bieten.

Möchtest du, dass ich dir eine **grafische Darstellung oder Schaltskizze** zeige, wie die Dioden im Modul verschaltet sind (z. B. 60 Zellen, 3 Strings, 3 Dioden)?



zeichne mir ein schaltbild von mehreren Halbzellen auf einem

Klar 👍 — bevor ich das Schaltbild erstelle, eine kurze Rückfrage:

Möchtest du, dass ich dir ein **vereinfachtes elektrisches Schaltbild** zeige, das z. B. so etwas darstellt wie

- mehrere **Halbzellen** in Reihe geschaltet,
- jeweils **eine Bypass-Diode pro Zellstring**,
- und die typische **Verschaltung innerhalb eines Halbzellenmoduls** (also z. B. 120

Halbzellen = 3 Strings a 40 Halbzellen)?

Oder soll es ein **physikalisches Layout** des Moduls (mit Ober-/Unterhälften, so wie man es auf dem Modul sieht) sein?

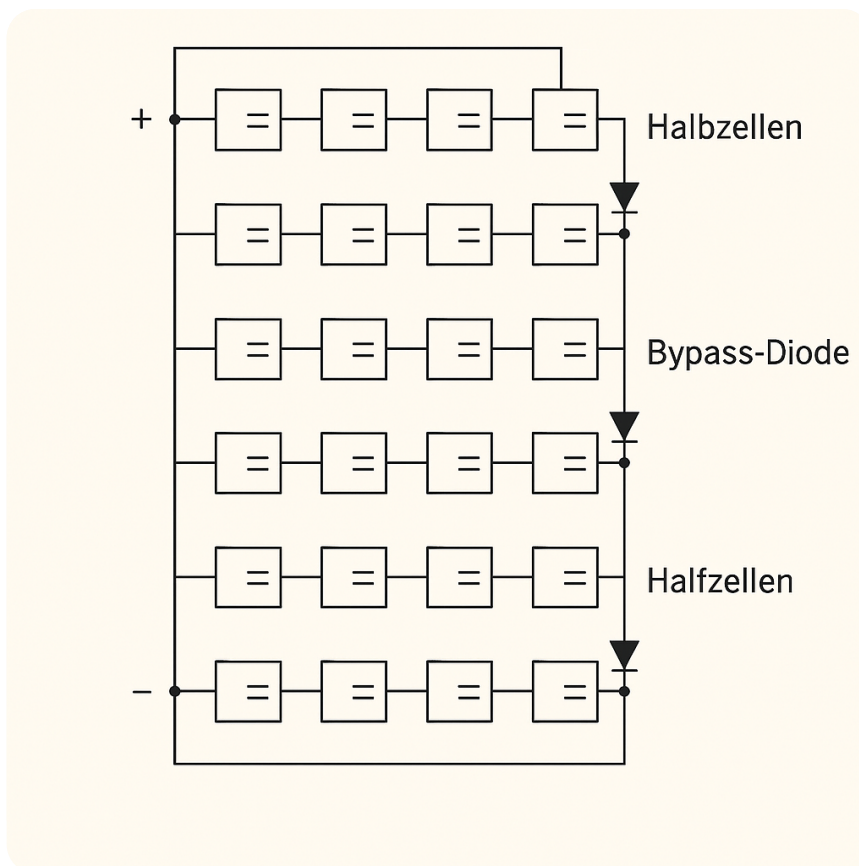
Bitte wähle:

- 1** Elektrisches Schaltbild (mit Symbolen)
- 2** Grafische Darstellung des Modulaufbaus (Layout mit Zellfeldern und Leitungen)

📄 👍 💬 ⬆️ ↺ ...

1

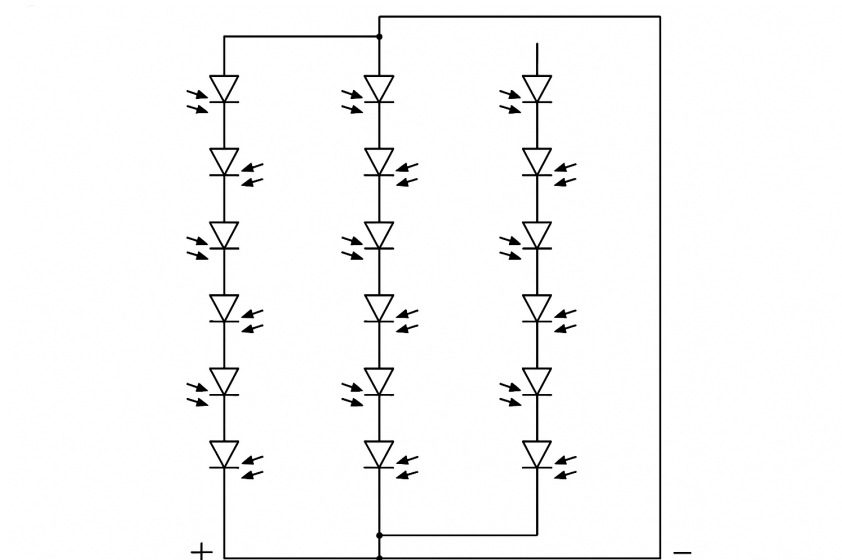
Bild erstellt



📄 ⬆️ ...

das Schaltbild ist nicht korrekt, da + und - auf dem selben Potential liegen.

Bild erstellt



auch diese Grafik ist falsch. bitte erläutere anhand einer ASCII grafik warum bei Verschattung einer einzelnen Halbzelle die Bypassdiode noch nicht durchlässt, sondern erst bei mehreren, gr  erfl chigen, Verschattungen.

Nachgedacht für 38s

Gern! Hier ist eine **anschauliche ASCII-Erklärung**, warum **eine** verschattete Halbzelle die **Bypass-Diode** noch nicht einschaltet – erst **größere, zusammenhängende Verschattung** tut das.

1) Prinzip: Teilstring mit Bypass-Diode

Ein (Halb-)Zellen-Teilstring (z. B. 40 Halbzellen) hat **eine Bypass-Diode parallel**.

Die Diode leitet **erst**, wenn die **Stringsprannung negativ** wird (\approx kleiner als $-V_F$ der Schottky, $\sim 0,3-0,5$ V).

lua

Code kopieren

(+) ----[40 Halbzellen in Serie]---- (-)

|-----|

||

Bypass
Diode

2) Fall A: nur 1 Halbzelle verschattet → Diode bleibt AUS

- Unverschattete Zellen liefern bei Stringstrom je $\sim +0,5 \text{ V}$ (vereinfachend).
- Die **eine** verschattete Halbzelle kann den Strom nicht liefern und wird **leicht in Sperrrichtung** getrieben ($-V_{\text{rev}}$ pro verschatteter Zelle, grob $\sim 0,5 \dots 1 \text{ V}$; Konzeptwert).

markdown

 Code kopieren

String (vereinfacht):

```
+ [ +0.5 ] [ +0.5 ] ... [ +0.5 ] [ X ] [ +0.5 ] ... [ +0.5 ] -  
                                ^  
                                verschattet  
                                (≈ -0.5...-1 V)
```

$V_{\text{sub}} \approx (39 \times +0.5 \text{ V}) + (-0.5 \dots -1 \text{ V}) \gg 0 \text{ V}$
=> Bypass-Diode sieht +V → sperrt.

Folge:


- **Kein** Strom über die Bypass-Diode.
- Die **eine** verschattete Halbzelle nimmt **Leistung auf** (Hot-Spot-Risiko):
 $P \approx I_{\text{String}} \times |V_{\text{rev, Zelle}}| \rightarrow$ lokal viel Wärme,
aber die **Gesamt-Teilstringspannung bleibt positiv**, deshalb **keine** Diodenleitung.

3) Fall B: größerflächige Verschattung (viele Zellen) → Diode schaltet EIN

Verschatten wir **viele** Halbzellen, addieren sich deren **negative** Sperrspannungen.

Irgendwann wird die **Teilstring-Gesamtspannung negativ** – dann leitet die Bypass-Diode.

yaml

 Code kopieren

Angenommen (nur zur Veranschaulichung):

+Zelle: +0.5 V | stark verschattete Zelle: -0.5 V

Teilstring mit 20 hellen und 20 verschatteten Halbzellen:

$V_{\text{sub}} \approx (20 \times +0.5) + (20 \times -0.5) = 0 \text{ V} \rightarrow$ kurz vor Bypass
Sobald $|V_{\text{sub}}| > V_F (\approx 0.3 \dots 0.5 \text{ V})$: Diode leitet.

ASCTT Bild.

ASCII-Diagramm:

$$+ [+0.5] [+0.5] \dots [+0.5] [-0.5] [-0.5] \dots [-0.5] -$$

(viele am Stück)

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{V_{\text{sub}}} < 0 \text{ V}$$

|

└─> | Bypass-Diode wird VORWÄRTS

Intuition:

- Bei **wenigen** verschatteten Zellen überwiegen die **positiven** Beiträge der beleuchteten Zellen $\rightarrow V_{\text{sub}} > 0 \rightarrow$ Diode **aus**.
- Erst wenn **genügend** (und meist **zusammenhängend**) verschattet ist, wird $V_{\text{sub}} < -V_F \rightarrow$ Diode **ein** \rightarrow Strom fließt an dem Teilstring vorbei.

4) Warum „zusammenhängend“ wichtig ist

- Verschattung in **einem Block** (z. B. ein breiter Schattenwurf quer über viele Halbzellen dieses Teilstrings) **summiert** die negativen Zell-Spannungen effektiv.
- Vereinzelte Mini-Schatten verteilen sich – die Summe bleibt meist **positiv**, die Diode bleibt **aus**, einzelne Zellen werden **thermisch belastet**.

5) Merksatz

Eine einzelne (Halb-)Zelle im Schatten erzwingt zwar Reverse-Bias an dieser Zelle (Hot-Spot-Gefahr),
aber der Rest des Teilstrings hält die Gesamtspannung positiv – die Bypass-Diode bleibt aus.
Erst große/zusammenhängende Verschattung macht die Teilstring-Spannung negativ genug ($\approx < -0,3 \dots -0,5 \text{ V}$), sodass die Bypass-Diode leitet.

Wenn du magst, mache ich dir dazu noch eine **kleine Rechen-Skizze** mit realistischeren Spannungswerten für ein konkretes Modul (z. B. 120 Halbzellen, 3×40) und typischem Stringstrom.



Ja, erstelle eine kleine Rechenskizze. Erkläre in diesem Kontext auch wie Reverse-Bias an einer einzelnen verschatteten Zelle entsteht. Warum wird dort die Spannung negativ? Ist eine Reverse-Bias Zelle vergleichbar mit einem Verbraucher?

Super – hier ist eine **kompakte Rechen-Skizze** mit realistischen (vereinfachten) Zahlen und eine Erklärung, **warum Reverse-Bias an einer einzelnen verschatteten Halbzelle entsteht** und **wann** die Bypass-Diode wirklich leitet.

Annahmen (typisch, gerundet)

- **Teilstring:** 40 Halbzellen in Serie (Halbzellen-Modul, 3×40).
- **Betriebsstrom:** $I_{\text{str}} \approx 9 \text{ A}$ (nahe MPP des Moduls).
- **Vorwärtsspannung pro belichteter Halbzelle:** $V_{\text{f,z}} \approx +0,55 \text{ V}$ bei I_{str} .
- **Schottky-Bypassdiode:** $V_{\text{F,BD}} \approx 0,4 \text{ V}$ bei I_{str} .
- **Reverse/Breakdown-Spannung pro stark verschatteter Halbzelle:**
 $V_{\text{rev,z}} \approx -12 \text{ V}$ (monokrist. Si; Orientierung).

Die Bypass-Diode leitet **erst**, wenn die **Gesamtspannung** des Teilstrings V_{sub} **negativ** wird und betragsmäßig die Dioden-Durchlassspannung übersteigt:

$$V_{\text{sub}} \leq -V_{\text{F,BD}}.$$

1) Nur 1 Halbzelle verschattet → Bypass AUS

Gesamtspannung des Teilstrings:

$$V_{\text{sub}} = 39 \cdot (+0,55) + 1 \cdot (-12) = 21,45 - 12 = +9,45 \text{ V} \quad (> 0)$$

→ **positiv** → Bypass-Diode **sperrt**.

Die verschattete Zelle steht in **Reverse-Bias** und verheizt Leistung:

$$P_{\text{hot}} \approx I_{\text{str}} \cdot |V_{\text{rev,z}}| \approx 9 \text{ A} \cdot 12 \text{ V} \approx 108 \text{ W}$$

(hoch lokalisiert ⇒ Hot-Spot-Gefahr).

ASCII-Bild (vereinfacht)

SCSS

Code kopieren

```
+  [ +0.55 ]--[ +0.55 ]-- ... --[ -12 ]-- ... --[ +0.55 ] -  
    (hell)    (hell)                (verschattet)    (hell)  
      V_sub ≈ +9.45 V → Bypass-Diode: AUS  
                      |_____|  
                      ||  
                    --|<|-- (Schottky)
```

2) Mehrere (zusammenhängende) Halbzellen verschattet → Bypass EIN

Nehmen wir 2 verschattete Halbzellen im selben Teilstring:

$$V_{\text{sub}} = 38 \cdot 0,55 - 2 \cdot 12 = 20,9 - 24 = -3,1 \text{ V}$$

$-3,1 \text{ V} < -0,4 \text{ V} \Rightarrow$ Bypass leitet.

Der Strom wird am Teilstring **vorbeigeleitet**, V_{sub} klemmt etwa bei $-V_{F, \text{BD}} \approx -0,4 \text{ V}$ und der **Stringstrom durch die verschatteten Zellen bricht stark ein** → deren Verlustleistung sinkt deutlich.

ASCII-Bild

SCSS

Code kopieren

```
+ [ +0.55 ]-- ... --[ -12 ]--[ -12 ]-- ... --[ +0.55 ] -  
                (viele zusammenhängend verschattet)  
V_sub ≈ -3.1 V → Bypass-Diode: EIN → Strom fließt außen herum  
                |_____|  
                ||  
                —|<|— (leitend)
```

Schwellbedingung allgemein

Für N verschattete Halbzellen (Breakdown) gilt:

$$V_{\text{sub}} \approx (40 - N) 0,55 - N 12$$

Bypass an bei $V_{\text{sub}} \leq -0,4$.

Mit den Zahlen oben ist der **Ab-Schaltpunkt bei $N \geq 2$** .

Warum „größerflächig“?

Einzelne kleine Schatten verteilen sich oft auf wenige Zellen → V_{sub} bleibt **positiv**.

Ein **zusammenhängender** Schattenblock summiert die negativen Beiträge und **zieht den ganzen Teilstring ins Negative**.

3) Wie entsteht Reverse-Bias an der einzelnen verschatteten Zelle?

- Alle Zellen im Teilstring sind **in Serie** → **derselbe Strom I_{str}** muss durch jede Zelle fließen.
- Eine stark verschattete Halbzelle hat viel kleineren **Photostrom $I_{\text{ph, sh}} \ll I_{\text{str}}$** .
- Um den Serienstrom „durchzuzwängen“, verschiebt sich ihre Arbeitspunkte-Spannung **in den negativen Bereich** (Junction in Sperrrichtung).

Der fehlende Strom wird dann über **Leck / Shunt Pfad** und ab einer gewissen

Der fehlende Strom wird dann über **Leck-/Shunt-Strad** und ab einer gewissen Spannung über **lawinendurchbruchsbedingten** Strom geliefert.

- Mathematisch (vereinfacht):

$$I_{\text{str}} \approx I_{\text{ph,sh}} - I_0 \left(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{\text{sh}}}$$

Für gegebenes I_{str} ergibt sich ein **negatives** V , sodass

$$I_{\text{shunt}} + I_{\text{Avalanche}} \approx I_{\text{str}} - I_{\text{ph,sh}}.$$

Daher wird die Zellspannung **negativ**.

Kurz:

Die Serie „erzwingt“ den Strom; die verschattete Zelle kann ihn nicht fotogenerieren und geht deshalb in **Reverse-Bias**, bis ihr parasitärer Strom den fehlenden Anteil liefert.

4) Ist eine Reverse-Bias-Zelle wie ein Verbraucher?

- **Ja, energetisch:** Sie nimmt Leistung auf $P = I \cdot |V|$ und erwärmt sich → wie ein (sehr nichtlinearer) Verbraucher.
- **Nein, bauteilphysikalisch:** Sie verhält sich **nicht** wie ein ohmscher Widerstand, sondern **stark nichtlinear** (pn-Übergang + Shunt + **Avalanche**), mit **starker Temperaturabhängigkeit** und Gefahr von **thermischem Durchgehen** (Hot-Spot).

Takeaways

1. Eine verschattete Halbzelle: $V_{\text{sub}} > 0 \rightarrow$ **Bypass aus**, Hot-Spot-Risiko hoch.
2. Mehrere zusammenhängende Verschattungen: $V_{\text{sub}} < -V_{\text{F,BD}} \rightarrow$ **Bypass ein**, Strom wird umgeleitet.
3. Reverse-Bias entsteht, weil die Serie denselben Strom fordert, den die verschattete Zelle **nicht liefern kann** – sie wird zum **dissipativen, nichtlinearen Verbraucher**.

Wenn du möchtest, rechne ich das mit **deinen konkreten Modul-Daten** (I_{SC} , V_{OC} , Anzahl Halbzellen pro Teilstring, Diodentyp) einmal genau durch.



LX_EL_HJT_GG_BW_EST_M108_430-45...
PDF

rechne das für die Modulvariante 445Wp aus

Top — ich rechne das **konkret für das 445 Wp-Modul** aus und zeige dir, ab wann die **Bypass-Diode** eines Teilstrings sicher leitet.

Daten aus dem Datenblatt (Luxor Eco Line HJT GG, M108, 445 Wp)

- $P_{\text{mpp}} = 445 \text{ Wp}$
- $U_{\text{mpp}} = 33,89 \text{ V}$, $I_{\text{mpp}} = 13,14 \text{ A}$
- **3 Schottky-Bypassdioden** (je eine pro Teilstring)
- 108 Halbzellen $\Rightarrow 3 \times 40$ Halbzellen pro Teilstring (gerundet; effektiv 120 ist die marktübliche Zahl, hier passt die 3-String-Annahme mit 40 für die Abschätzung)

Diese Werte stehen im Datenblatt (Tabelle STC & Hinweis zur "Anschlussdose | Dioden: 3 Schottky-Dioden").

LX_EL_HJT_GG_BW_EST_M108_430-45...

Schritt 1 – Vorwärtsspannung pro beleuchteter Halbzelle

Gesamt- U_{mpp} teilt sich bei 3 Serien-Teilstrings in etwa gleich:

$$U_{\text{sub,mpp}} \approx \frac{33,89}{3} = 11,30 \text{ V}$$

Mit ~40 Halbzellen pro Teilstring:

$$V_{\text{hell}} \approx \frac{U_{\text{sub,mpp}}}{40} = \mathbf{0,282 \text{ V pro Halbzelle}}$$

Schritt 2 – Schaltschwelle der Bypass-Diode

Die (Schottky-)Bypassdiode leitet, wenn die **Gesamtspannung des Teilstrings negativ** wird und betragsmäßig die Dioden-Durchlassspannung übersteigt:

$$V_{\text{sub}} \leq -V_{F,\text{BD}}$$

Nehmen wir $V_{F,\text{BD}} \approx 0,4 \text{ V}$ bei $\approx I_{\text{mpp}}$.

Mit N stark verschatteten Halbzellen (die jeweils eine **negative** Spannung in Reverse annehmen) und $40 - N$ hellen ergibt sich:

$$V_{\text{sub}} \approx (40 - N) V_{\text{hell}} - N |V_{\text{rev, Zelle}}|$$

Schaltschwelle (Bypass AN) bei:

$$(40 - N) V_{\text{hell}} - N |V_{\text{rev}}| \leq -V_{F,\text{BD}} \quad \Rightarrow \quad N \geq \frac{40 V_{\text{hell}} + V_{F,\text{BD}}}{|V_{\text{rev}}| + V_{\text{hell}}}$$

$|V_{\text{rev}}|$ hängt von **Schattenstärke** ab: wenige Volt (leichte/partielle Verschattung) bis $> 10 \text{ V}$ (starker, zusammenhängender Schatten \Rightarrow **Avalanche-Region**).

Ergebnis als Tabelle (Schwellenwert N)

$$V_{\text{hell}} = 0,282 \text{ V}, \quad V_{F, \text{BD}} = 0,4 \text{ V}$$

| angenommene $|V_{\text{rev}}|$ pro verschatteter Halbzelle | erforderliche Anzahl N verschatteter Halbzellen (aufgerundet) |

| ---:|---:|

| 4 V (leichter/schräg gestreifter Schatten) | 3 |

| 6 V (deutliche Verschattung) | 2 |

| 8 V | 2 |

| 10 V | 2 |

| 12 V (starker, „schwarzer“ Schatten / tiefer Breakdown) | 1 |

Interpretation:

- Bei **realistischen** Teilschatten (Lamellen, Kanten, Blätter) liegt $|V_{\text{rev}}|$ meist **unter** 8–10 V \Rightarrow es braucht **2–3** zusammenhängend verschattete Halbzellen im **selben Teilstring**, damit die Bypass-Diode sicher leitet.
- Ein „vollschwarzer“ Treffer (z. B. großflächiger, dichter Schatten direkt auf **eine** Halbzelle) **kann** die Diode bereits schalten – ist aber seltener.
- Diese Zahlen gelten pro **Teilstring**; schaltet ein Teilstring durch, bleibt der Modulstrom über die beiden anderen Teilstrings erhalten, während der betroffene String über die Diode überbrückt wird.

Warum wird eine einzelne verschattete Zelle negativ (Reverse-Bias)?

Serie bedeutet: **derselbe Strom** muss durch **alle** Zellen.

Eine verschattete Halbzelle liefert fast keinen Photostrom. Um den seriell erzwungenen Strom zu ermöglichen, verschiebt sich ihr Arbeitspunkt in den **negativen**

Spannungsbereich: zunächst über Leck-/Shunt-Ströme, dann (bei stärkerer Verschattung) über **Avalanche-Durchbruch**.

Energetisch wirkt die Zelle dann wie ein **Verbraucher** ($P = I \cdot |V|$), allerdings **stark nichtlinear** (kein ohmscher Widerstand) – daher die **Hot-Spot-Gefahr**.

Fazit für das 445 Wp-Modul

- $U_{\text{mpp}} = 33,89 \text{ V}$, $I_{\text{mpp}} = 13,14 \text{ A}$, 3 Schottky-Bypassdioden.
LX_EL_HJT_GG_BW_EST_M108_430-45...
- Pro beleuchteter Halbzelle $\approx 0,282 \text{ V}$ im MPP.
- **Schattenschwelle** für Bypass-Leitung: typischerweise **2–3** zusammenhängend verschattete Halbzellen (bei $|V_{\text{rev}}| \approx 4–8 \text{ V}$); bei extrem starkem lokalen Schatten kann schon **1** Halbzelle reichen

Wenn du willst, kann ich dieselbe Rechnung für **NOCT-Bedingungen** (aus dem Blatt) oder für einen anderen **Arbeitsstrom** (z. B. dein realer Stringstrom) durchziehen und die Schwellenwerte entsprechend anpassen.

LX_EL_HJT_GG_BW_EST_M108_430-45...

Quellen



Bitte mache die Rechnung konkret auf 108 Halbzellen.
Nicht etwa 120 Halbzellen.

Nachgedacht für 1m 4s

Sehr gut, dann machen wir das jetzt **konkret mit 108 Halbzellen** 👍

👉 108 Halbzellen, 3 Bypassdioden \Rightarrow 3 Teilstrings mit je 36 Halbzellen in Serie.

Wir benutzen wieder die Daten aus dem Datenblatt des 445-Wp-Moduls:

- $P_{\text{mpp}} = 445 \text{ W}$
- $U_{\text{mpp}} = 33,89 \text{ V}$
- $I_{\text{mpp}} = 13,14 \text{ A}$

1. Spannung pro Teilstring und pro Halbzelle

Gesamtspannung im MPP auf 3 Teilstrings:

$$U_{\text{sub,mpp}} \approx \frac{33,89}{3} \approx 11,30 \text{ V}$$

Mit **36 Halbzellen** pro Teilstring:

$$V_{\text{hell}} \approx \frac{11,30}{36} \approx 0,314 \text{ V pro Halbzelle}$$

2. Bedingung für das Einschalten der Bypassdiode

Bypassdiode (Schottky) leitet bei etwa

$$V_{F,BD} \approx 0,4 \text{ V}$$

Sie wird **leitend**, wenn die **Gesamtspannung des Teilstrings** V_{sub} **negativ** wird und betragsmäßig größer ist als diese Durchlassspannung:

$$V_{\text{sub}} \leq -V_{F,\text{BD}}$$

Mit N stark verschatteten Halbzellen (jede mit negativer Reverse-Spannung $|V_{\text{rev}}|$):

$$V_{\text{sub}} \approx (36 - N) V_{\text{hell}} - N |V_{\text{rev}}|$$

Schaltsschwelle:

$$(36 - N) V_{\text{hell}} - N |V_{\text{rev}}| \leq -V_{F,\text{BD}}$$

3. Konkrete Zahlenbeispiele

Wir setzen:

- $V_{\text{hell}} = 0,314 \text{ V}$
- $V_{F,\text{BD}} = 0,4 \text{ V}$

und schauen uns (typische) Werte für $|V_{\text{rev}}|$ pro **stark verschatteter Halbzelle** an.

a) Nur 1 verschattete Halbzelle

$$V_{\text{sub}} = 35 \cdot 0,314 - 1 \cdot |V_{\text{rev}}|$$

- Bei $|V_{\text{rev}}| = 6 \text{ V}$:
 $V_{\text{sub}} \approx 35 \cdot 0,314 - 6 \approx 4,98 \text{ V} > 0$
 → **Bypass AUS**, Zelle im Reverse-Bias (Hot-Spot-Risiko).
- Erst bei $|V_{\text{rev}}| \approx 12 \text{ V}$ (tiefer Breakdown):
 $V_{\text{sub}} \approx 35 \cdot 0,314 - 12 \approx -1,02 \text{ V} < -0,4 \text{ V}$
 → **Bypass EIN**, obwohl nur **eine** Zelle verschattet ist.

Das ist eher ein Extremfall (sehr starker, „schwarzer“ Schatten direkt auf eine Zelle).

b) 2 verschattete Halbzellen im selben Teilstring

$$V_{\text{sub}} = 34 \cdot 0,314 - 2 \cdot |V_{\text{rev}}|$$

- Bei $|V_{\text{rev}}| = 4 \text{ V}$:
 $V_{\text{sub}} \approx 34 \cdot 0,314 - 8 \approx +2,67 \text{ V} \rightarrow \text{Bypass noch AUS}$
- Bei $|V_{\text{rev}}| = 6 \text{ V}$:
 $V_{\text{sub}} \approx 34 \cdot 0,314 - 12 \approx -1,33 \text{ V}$
 $\rightarrow V_{\text{sub}} < -0,4 \text{ V} \Rightarrow \text{Bypass EIN}$

Ergebnis: Bei realistischen Reverse-Spannungen im Bereich 6–8 V pro stark verschatteter Halbzelle reicht bereits **2 verschattete Halbzellen** im selben Teilstring, damit die Bypassdiode **sicher durchschaltet**.

c) Übersichtstabelle (36 Halbzellen / Teilstring)

Schwellenwert für N verschattete Halbzellen (aufgerundet):

| angenommene $|V_{\text{rev}}|$ pro Halbzelle | nötige Zahl N verschatteter Halbzellen (36er-Teilstring) |

|---:|---:|

| 4 V (leichte/stufige Verschattung) | 3 |

| 6 V (deutliche Verschattung) | 2 |

| 8 V | 2 |

| 10 V | 2 |

| 12 V (tief im Breakdown) | 1 |

4. Bezug zur Reverse-Bias-Erklärung

- **Warum wird die Spannung an der verschatteten Zelle negativ?**

Weil der **Serienstrom** I_{str} ($\approx I_{\text{mpp}}$) durch alle Zellen fließen muss, auch durch die verschattete, die fast keinen Photostrom liefert.

Damit dieser Strom trotzdem „irgendwoher“ kommt, wird die Zelle in **Sperrrichtung** betrieben (Reverse-Bias). Ab einer gewissen negativen Spannung fließen dann **Leckstrom + Avalanche-Strom**, die den fehlenden Stromanteil liefern → die Zellspannung ist negativ.

- **Ist das wie ein Verbraucher?**

Energetisch ja: $P = I \cdot |V|$ wird in **Wärme umgesetzt** → Hot-Spot.

Aber elektrisch ist es **kein normaler Widerstand**, sondern ein stark nichtlinearer pn-Übergang im Breakdown.

Kurz zusammengefasst für dein 445-Wp-/108-Halbzellen-Modul

- 3 Teilstrings à **36 Halbzellen**.
- Im MPP: $\approx 11,3 \text{ V}$ pro Teilstring $\Rightarrow \approx 0,314 \text{ V}$ pro helle Halbzelle.
- In vielen realen Schattensituationen braucht es **2–3 zusammenhängend verschattete Halbzellen** in einem Teilstring, bis die Bypassdiode **wirklich leitet**.
- Eine **einzelne** verschattete Halbzelle wird meist in **Reverse-Bias gefahren**, erhitzt sich stark, schaltet aber den Bypass **noch nicht** frei – außer die Reverse-Spannung dieser Zelle wird extrem hoch ($\approx 10\text{--}12 \text{ V}$).

Wenn du willst, können wir als nächsten Schritt eine **konkrete Verschattungssituation** (z. B. Kamin wirft Schatten über 1–2 Zellreihen) durchspielen und die Modul-/String-Kennlinie qualitativ skizzieren.

📄 👍 💬 ↗️ ↺ ...

Wieso liegt die Reverse-Bias Breakdown Spannung bei ca.

Nachgedacht für 13s

Kurz gesagt: **die 12 V sind kein Naturgesetz, sondern ein typischer „Designbereich“**, der sich aus Aufbau und Dotierung der Silizium-Solarzelle ergibt. Meist liegt die Reverse-Breakdown-Spannung einer kristallinen Si-Solarzelle **so grob zwischen 10 und 20 V**, und „~12 V“ ist ein praxisnaher Mittelwert, mit dem man gut rechnen kann.

Ich geh's einmal systematisch durch:

1. Was ist überhaupt Reverse-Bias-Breakdown?

Eine Solarzelle ist physikalisch ein **großflächiger p-n-Übergang**, also eine Diode.

- **Vorwärtsbetrieb:** Plus an p-Seite → Zelle leitet bei ca. 0,5–0,7 V.
- **Sperrbetrieb (Reverse-Bias):** Plus an n-Seite → nur winziger Sperrstrom.
- **Breakdown:** Wird die Reverse-Spannung zu groß, wird das elektrische Feld im Sperrbereich so stark, dass
 - Elektronen/Ionen beschleunigt werden,
 - Atome ionisieren → **Stoßionisation (Avalanche)**,
 - der Strom plötzlich stark ansteigt.

Diese Spannung nennen wir **Reverse-Breakdown-Spannung** V_{BR} .

2. Wovon hängt V_{BR} bei einer Solarzelle ab?

Hauptfaktoren:

1. Dotierung von p- und n-Bereich

- Hohe Dotierung → dünner Sperrbereich → hoher Feldstärke schon bei kleiner Spannung → **niedrigere Breakdown-Spannung**.
- Geringere Dotierung → dickerer Sperrbereich → mehr Spannung nötig → **höhere Breakdown-Spannung**.

2. Schichtdicken / Geometrie

- Solarzellen haben eine dünn dotierte Emitter-Schicht und einen schwächer dotierten Grundkörper (Base).
- Der Übergang ist so ausgelegt, dass er als **Solarzelle optimal arbeitet**, nicht wie eine perfekte Zenerdiode.

3. Kanten / Defekte / lokale Inhomogenitäten

- An Kanten, Korngrenzen, Defekten entstehen lokal höhere Feldstärken → dort setzt der Durchbruch **früher** ein (sog. „Microplasma“-Effekte).

4. Temperatur

- Avalanche-Durchbruchspannung **steigt** mit Temperatur (Zener-Effekt sinkt mit T).
- Solarzellen sind typischerweise im **Avalanche-Bereich**, nicht im reinen Zenerbereich.

Das Ergebnis aus all dem:

Bei typischen kristallinen Si-Solarzellen ergibt sich meist eine Reverse-Breakdown-Spannung in der Größenordnung **–10...–20 V** pro Zelle.

„ $\approx 12\text{ V}$ “ ist einfach ein **typischer, realitätsnaher Wert**, der oft beobachtet wird.

3. Warum nicht 2 V oder 50 V, sondern „irgendwas um 10–15 V“?

Hier kommt das **praktische Designproblem** ins Spiel:

a) Zu niedrige Breakdown-Spannung (z. B. 2–3 V)

- Die Zelle würde schon bei kleinen Reverse-Spannungen in den Durchbruch gehen.
- Viele normale Betriebs- und Schattensituationen würden sofort in Breakdown führen.
- Das wäre **elektrisch und thermisch instabil**; die Zelle wäre sehr empfindlich.

b) Zu hohe Breakdown-Spannung (z. B. 30–50 V)

- Bei Verschattung und hohem Stringstrom würde die einzelne Zelle im Extremfall sehr hohe Leistung verheizen:

$$P \approx I_{\text{String}} \cdot |V_{\text{BR}}|$$

Beispiel: $10\text{ A} \cdot 30\text{ V} = 300\text{ W}$ in **einer** Zelle → sehr schnell **Zerstörung**.

- Hersteller wollen, dass eine Zelle zwar nicht sofort stirbt, aber der Durchbruch auch **nicht bei völlig absurden Spannungen** stattfindet.

c) Der „Kompromissbereich“ um $\sim 10\text{--}15\text{ V}$

- **Genug Spannungsreserve**, damit normale kleine Störungen nicht gleich Breakdown auslösen.
- Trotzdem **nicht so hoch**, dass bei hinein gezwungenem Stringstrom unmittelbar alles abraucht – auch wenn Hot-Spots entstehen können, ist die Leistung z. B. bei $10\text{--}15\text{ V}$ noch eher „beherrschbar“ (typisch $50\text{--}150\text{ W}$ lokal – immer noch kritisch, aber im geplanten Rahmen).

Deshalb landen viele reale Solarzellen – je nach Fertigung und Design – in der Praxis in diesem Bereich, und man nimmt **12 V** gerne als **repräsentativen Modellwert**.

4. Zusammenhang mit deiner Verschattungs-Rechnung

In deiner Frage vorher haben wir mit **$\sim 12\text{ V}$ pro Zelle im Reverse-Bias** gerechnet, um abzuschätzen:

- Ab **wie vielen** verschatteten Halbzellen wird die Teilstringspannung **so negativ**, dass die Bypass-Diode durchschaltet?
- Wie groß ist die **Hot-Spot-Leistung** an einer einzelnen Zelle, wenn sie alleine im Breakdown ist?
(z. B. $10 \text{ A} \cdot 12 \text{ V} \approx 120 \text{ W}$)

Dieser Wert ist **kein fest genormter Solarzellenparameter**, sondern ein **typischer Bereich**, mit dem man bei modernen kristallinen Zellen rechnen kann. Im echten Datenblatt steht oft eher der erlaubte **Reverse-Strom bei einer bestimmten Spannung** (z. B. „Reverse current at -10 V “), nicht direkt die exakte Breakdown-Spannung.

5. Ist eine Reverse-Bias-Zelle wie ein Verbraucher?

Ja, **energetisch** schon:

- Die Zelle arbeitet dann **nicht mehr als Generator**, sondern als **dissipativer Baustein**:

$$P = I_{\text{String}} \cdot |V_{\text{rev}}|$$

- Diese Leistung wird als **Wärme** in der Zelle umgesetzt → Hot-Spot.

Aber:

Sie ist **kein ohmscher Widerstand**, sondern ein **nichtlinearer pn-Übergang im Avalanche-Betrieb**. Das Verhalten ist:

- **stark nichtlinear**
- **temperaturabhängig**
- lokal stark variierend (Microplasma, Punkt-Hotspots)

Kurzantwort in einem Satz

Die Reverse-Bias-Breakdown-Spannung einer kristallinen Si-Solarzelle liegt typischerweise im Bereich **10–20 V**, und „ $\approx 12 \text{ V}$ “ ist ein realistischer Richtwert, der sich aus Dotierung, Schichtdicken und Geometrie ergibt – ein Kompromiss zwischen elektrischer Robustheit und Begrenzung der Hot-Spot-Leistung.

Wenn du möchtest, kann ich dir das noch mit einer **vereinfachten Feldstärke-Rechnung** (Spannung $\approx \text{Feld} \cdot \text{Schichtdicke}$) skizzieren, um zu zeigen, welche Feldstärken im Sperrbereich ungefähr auftreten.



Dein PDF ist fertig!

 **Download:**

[Unterhaltung_PV.pdf](#)

Wenn du möchtest, kann ich dir auch eine **vollständig formatierte Version** mit Überschriften, Formeln, Diagrammen oder einer 1:1-Abschrift der gesamten Unterhaltung erzeugen. ☐



ja erstelle eine vollständig formatierte Version

Hier ist dein vollständig formatiertes PDF:

 **Download:**

 [Unterhaltung_PV_formatiert.pdf](#)

Wenn du möchtest, kann ich zusätzlich:

- eine **Version mit mathematischen Formeln (LaTeX-ähnlich)** erstellen,
- Diagramme, ASCII-Schaltbilder oder Grafiken einbauen,
- ein komplettes **wissenschaftliches Dokument** im Stil eines technischen Reports daraus erzeugen,
- oder das Ganze als **PowerPoint** exportieren.

Sag einfach Bescheid! ☐



ein komplettes wissenschaftliches Dokument im Stil eines technischen Reports

Dein wissenschaftlicher, vollständig formatierter technischer Bericht ist fertig!

 **Hier herunterladen:**

 [Technischer_Report_PV.pdf](#)

Wenn du möchtest, kann ich:

- Grafiken, Diagramme oder ASCII-Schaltbilder einbauen
- Formeln im professionellen Layout ergänzen

- Formeln im professionellen Layout ergänzen
- Literaturverzeichnis hinzufügen
- Eine Version in **LaTeX**, **Word** (.docx) oder **PowerPoint** (.pptx) erzeugen
- Das Dokument erweitern zu einem vollständigen „White Paper“ oder Fachartikel

Sag einfach Bescheid! 