

3.4. Ersatzschaltbild, Zusammenschaltung und Abschaltung

Wir haben die Strom-Spannungskurve der beleuchteten Zelle hergeleitet:

$$I = I_0 [e^{qV/kT} - 1] - I_L$$

wobei

$$I_0 = A \left[\frac{q D_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{q D_h n_i^2}{L_h N_D} \right]$$

der Sättigungsstrom ist und der lichtinduzierte Strom

$$I_L = qAG [L_e + W + L_h]$$

Von den mittleren freien Weglängen L_e, L_h (weniger von der Brück $W \ll L_e, L_h$ der Verarmungszone) und der e^- -Loch Erzeugungsrate G abhängt. Die anderen Variablen oben sind:

$D_{e,h}$: Diffusionskonstante e^\ominus, h

q : Elementarladung

A : Fläche der Solarzelle

n_i^2 : intrinsische Konzentration

N_A, N_D : Dotierkonzentration des Akzeptoren + Donatoren

Bei genauer Betrachtung fällt auf, daß der Diodenstrom $I_0 [e^{qV/kT} - 1]$ dem Lichtgenerierten Strom I_L entgegenwirkt.

In der Tat rührt I_0 auch von der Rekombination in den quasi-neutralen Bereichen außerhalb der Raumladungszone her.

Betrachtet man zusätzlich noch die Rekombination durch Fallen in der Raumladungszone, kommt sogar noch ein weiterer Sättigungsstrom hinzu.

Aus dem alten I_0 wird I_{01} , denn neue Term hat den Faktor I_{02} und einen "Idealitätsfaktor" $n=2$ der Diodencharakteristike:

$$I = I_{01} [e^{qV/kT} - 1] + I_{02} [e^{qV/2kT} - 1] - I_L$$

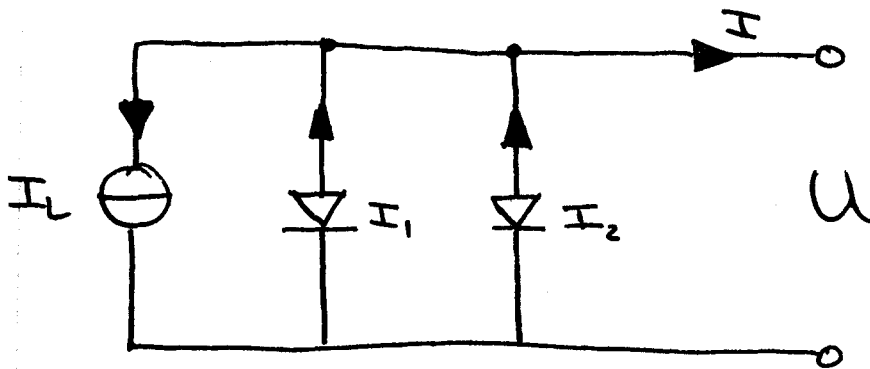
Wobei der I_{02} Term - vor allem bei höheren Spannungen in gutem Material

sub-dominant gegenüber dem I_{01} Term ist.

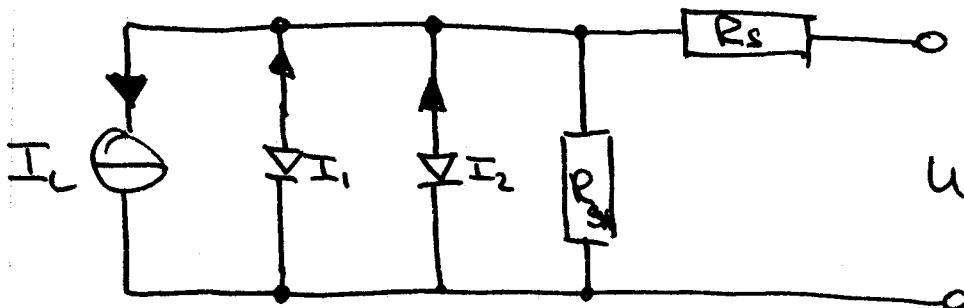
Nimmt man an, daß G_1, L_e, L_h und W in 1. Näherung konstant sind, kann man vereinfachend schreiben

$$I_L = \text{const. } G_1$$

Und ein einfaches Ersatzschaltbild der Zelle ist



Was fehlt, ist der Widerstand der Kontakte (Serienwiderstand) R_s und die Tatsache, daß der Widerstand von der Vorder- zur Rückseite Produktionsbedingt nicht ∞ ist. Er heißt Shunt Widerstand R_{SH} und ist parallel geschaltet:

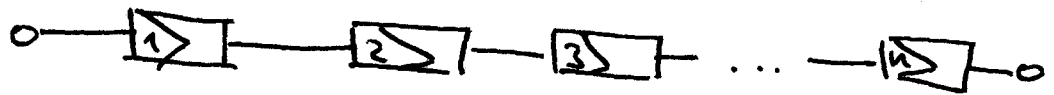


$$I = I_{01} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{kT}} - 1 \right] + I_{02} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{2kT}} - 1 \right] + \frac{(V+IR_s)}{R_{SH}} - I_L$$

R_s ist im $m\Omega$ Bereich, R_{SH} sollte deutlich $> 10 \Omega$, typisch mehrere 100Ω sein [wobei der Einfluß von R_{SH}] bei Werten $> 10 \Omega$ schon recht gering ist.

Reihenschaltung

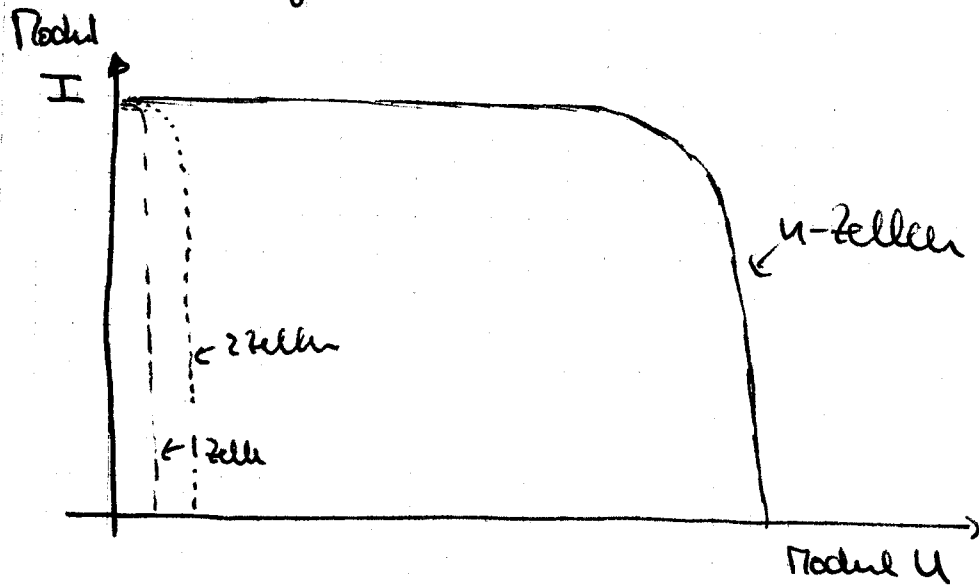
Um auf höhere Spannungen zu kommen, werden Zellen in Reihe geschaltet:



$$\Rightarrow I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$U = \sum_{i=1}^n U_i$$

und die Produktkennlinie kann im Fall von n identischen Zellen einfach aus den Einzelkennlinien zusammengesetzt werden:

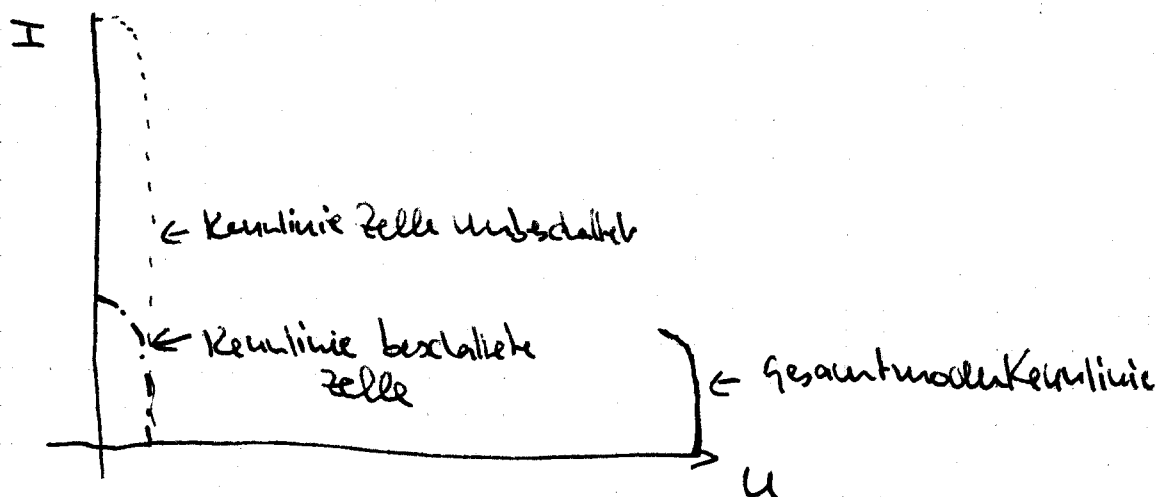


Abschätzung

Nehmen wir als Bsp an, dass eine Zelle zu 75% abgeschaltet ist und das Modul insgesamt aus 36 Zellen besteht. Dann ist

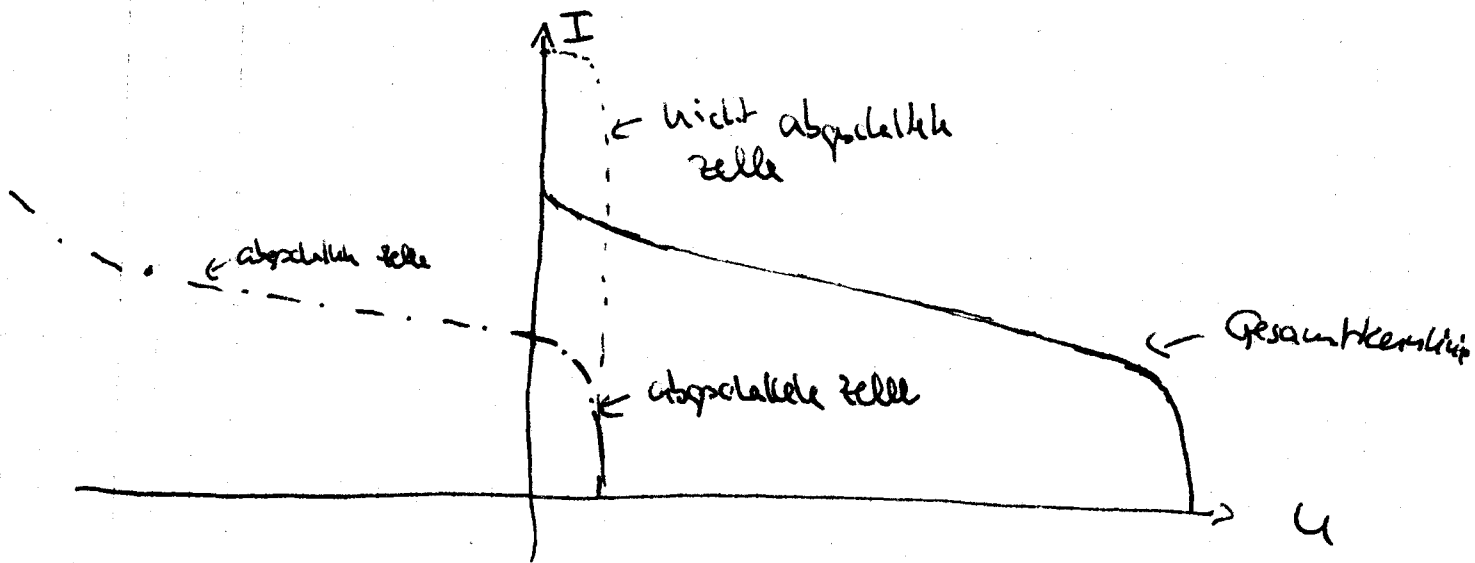
$$U = U_a(I) + 35U_b(I)$$

und man fängt am einfachsten von $I=0$ an, die Produktkennlinie zu konstruieren.



Bis zum Kurzschlussstrom der beschalteten Zelle ist die Konstruktion nicht schwierig, allerdings gelingt dies nur für ein kurzes Stück der Modulkurve.

Offensichtlich muß, um die Kurve zu vervollständigen, ein größerer Strom durch die abgeschaltete Zelle als deren Kurzschlussstrom? Das geht aber nur bei negativer Spannung an dieser Zelle! Unsere Zelle wird dann verbraucht?



Die Modulleistung nimmt durch Abschattung rapide ab. Obwohl nur 2% des Moduls in unserem Beispiel abgeschattet waren, sinkt die Modulleistung um ca. 70%. Dabei kann die abgeschaltete Zelle soviel Leistung aufnehmen, daß sie durch Überhitzung zerstört werden kann!

Um dies zu verhindern werden parallel zu den einzelnen Zellen oder aber Gruppen von Zellen Bypassdioden geschaltet. Sie begrenzen die negative Spannung auf einer abgeschalteten Zelle.