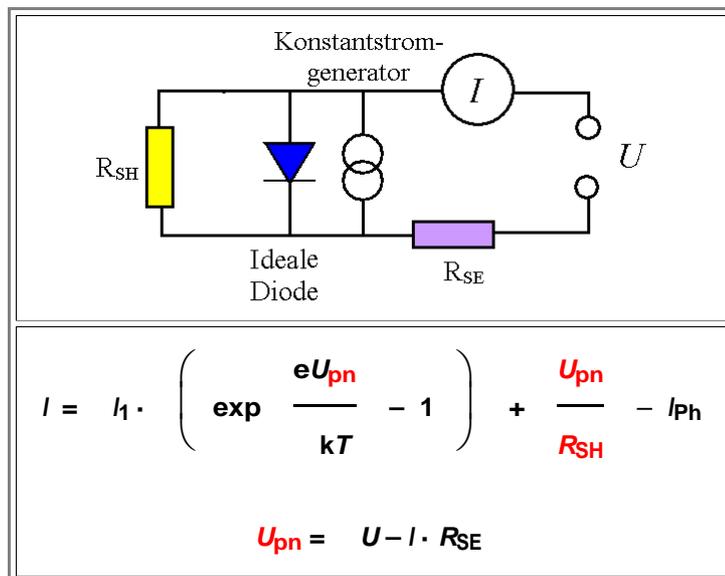


Lösung zur Übung 10.1-3

Kennlinien und Probleme realer Solarzellen

Hier ist der Ausgangspunkt für die Lösung der Aufgabe:



Diskutiere (qualitativ, wo nicht anders gefordert) den Einfluss der beiden Widerstände auf die Kennlinie. Betrachte zunächst nur die Grenzfälle mit $R_{SE} = 0 \Omega$ bzw. $R_{SH} \Rightarrow \infty \Omega$. Beschreibe den Einfluss dieser Widerstände einzeln (und dann zusammen) auf

- Leerlaufspannung
- Kurzschlussstrom
- Sperrstrom im Dunkeln
- Füllfaktor
- Wirkungsgrad

Das ist ein umfangreiches Programm; aber machbar:

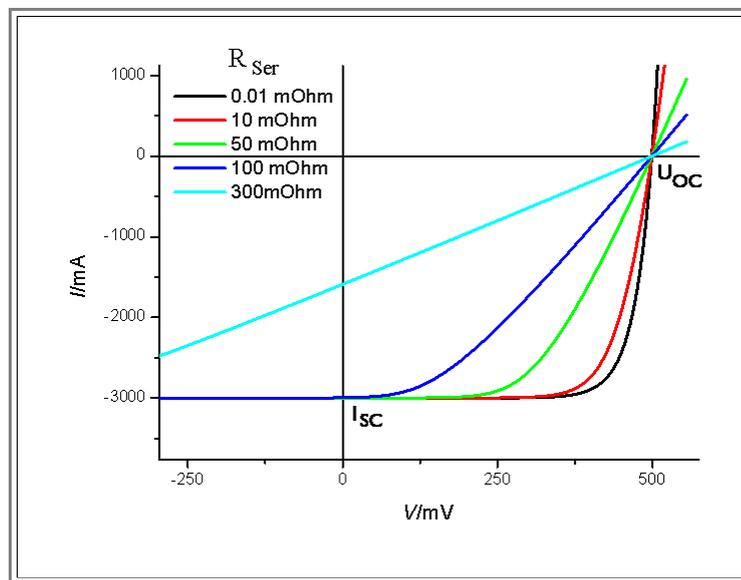
Serienwiderstand R_{SE}

Für einen erstmal vernachlässigbaren Shuntwiderstand R_{SH} können wir leicht ein paar qualitative Fakten deduzieren:

- Für $I = 0 \text{ A}$ haben wir $U_{pn} = U$. Das bedeutet, dass *alle* IU Kennlinien auf der Spannungsachse durch U_{OC} laufen müssen.
- Für große negative U (also Sperrichtung) ist I schlicht konstant. Wir verlieren einen Teil der Spannung im Serienwiderstand, aber das macht nichts. Die Kennlinie im 3. Quadranten hängt damit nicht von R_{SE} ab sofern $|U|$ groß genug ist.
- Für große positive U (also Vorwärtsrichtung) würde die ideale $U_{OC} \approx 0.5 \text{ V}$ Diode oberhalb von ca. 0.5 V sehr große Ströme durchlassen, oder anders ausgedrückt, der Diodenwiderstand ($R_{diode} = dU/dI$) der idealen Diodenkennlinie wird sehr klein. Mit einem merklichen Serienwiderstand $R_{SE} > R_{diode}$ wird die IU Kennlinie vom Serienwiderstand dominiert werden, d.h. sie degeneriert zu einer Geraden mit Steigung $1/R_{SE}$.
- Im interessierenden 4. Quadranten für Spannungen kleiner als U_{OC} fällt ein Teil der Spannung im Serienwiderstand ab. Der pn -Übergang hat weniger Spannung, der Strom kann also (*betragsmäßig*!) nur kleiner sein als bei der Kennlinie ohne Serienwiderstand. *Aufpassen!* Mit Vorzeichen ist er größer, denn -3 ist größer als -5 !

Setzt man das alles zusammen, muss man qualitativ Kennlinien erhalten, wie im folgenden Bild (sauber numerisch gerechnet!) gezeigt.

- Die Kennlinie zeigt unsere Referenz- Solarzelle mit Zahlen an den Achsen. Zumindest für die größeren Serienwiderstände sollte auch die qualitative Lösung so ähnlich aussehen



Wir können damit eine Reihe von Schlussfolgerungen ziehen

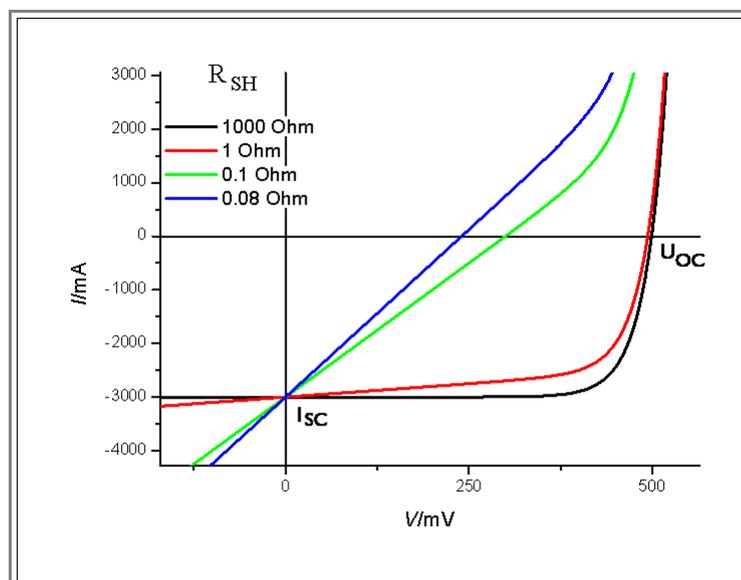
1. Der Wirkungsgrad η ist proportional zu $I_{SC} \cdot U_{OC} \cdot FF$. Für nicht zu große Serienwiderstände (im Beispiel oben $R_{SE} < 100 \text{ m}\Omega$) verringert ein Serienwiderstand also primär den Füllfaktor und reduziert damit den Wirkungsgrad η .
2. Während im normalen "elektrotechnischen" Leben Widerstände im Milliohmbereiche so gut wie keine Rolle spielen, sind hier einige $\text{m}\Omega$ schon deutlich spürbar.
3. Mit dem gegebenen spezifischen Widerstand bester Metalle von ca. $\rho \approx 2 \mu\Omega\text{cm}$ sieht man, das ein **1 cm** langer **Cu** Draht mit einem **1 mm²** Querschnitt bereits einen Widerstand von **$R = 2 \text{ m}\Omega$** hat. Das bedeutet: Wir haben schon bei der Kontaktierung (dem "Grid" auf der Solarzelle) ein *massives Problem mit Serienwiderständen realer Solarzellen!*

Shunt Widerstand R_{SH}

Für einen vernachlässigbaren Serienwiderstand können wir leicht ein paar qualitative Fakten deduzieren:

1. Es gilt immer $U_{pn} = U$. Für $U_{pn} = U = 0 \text{ V}$ müssen alle Kennlinien durch I_{SC} laufen, da $U_{pn}/R_{SH} = 0$.
2. Ansonsten haben wir alle Spannungen U in *Rückwärts*- und *Vorwärts* richtung den Strom $I_{SH} = U_{pn}/R_{SH}$ der zum Diodenstrom (vorzeichenrichtig) addiert werden muss. Das schiebt den Kennlinienstrom um U_{pn}/R_{SH} "nach oben" zu *kleineren* Absolutwerten und größeren "Vorzeichen"-Werten (siehe oben). Die vorher flache Kennlinie wird steil mit der Steigung $1/R_{SH}$
3. Im 4. Quadrant, auf den es ankommt, verlieren wir Spannung und Füllfaktor, damit geht der Wirkungsgrad η kräftig runter.
4. Darüber hinaus nimmt der (Betrag) des Sperrstroms linear mit der Sperrspannung zu. Das ist ein großes Problem sobald unsere Solarzelle mit anderen verschaltet wird, d. h. in einem Solar*modul*.

Hier sind die entsprechenden (wieder sauber numerisch berechneten) Kennlinien. Auch qualitativ muss man auf einen solchen Graphen kommen.



Wir können wieder einige Schlussfolgerungen ziehen:

1. Der Wirkungsgrad η ist proportional zu $I_{sc} \cdot U_{oc} \cdot FF$. Falls R_{SH} nicht zu klein wird (im Beispiel $> \approx 1\Omega$), sind Shunts nicht allzu schlimm. Andererseits sind *richtige Kurzschlüsse* ($R_{SH} < \approx 1\Omega$) tödlich.
2. Da Solarzellen sehr ausgedehnte pn-Übergänge haben, die außerdem noch bis zur "Kante" reichen, müssen wir mit vielen kleinen "*Kurzschlüsschen*" rechnen. Wie eine Reihe von kleinen lokalisierten "*Kurzschlüsschen*", die jeder für sich nicht viel Böses tun, die Gesamt-Solarzelle beeinflussen, die wir hier betrachten, ist ein trickreiches Problem (man kann sie nicht einfach "aufaddieren").