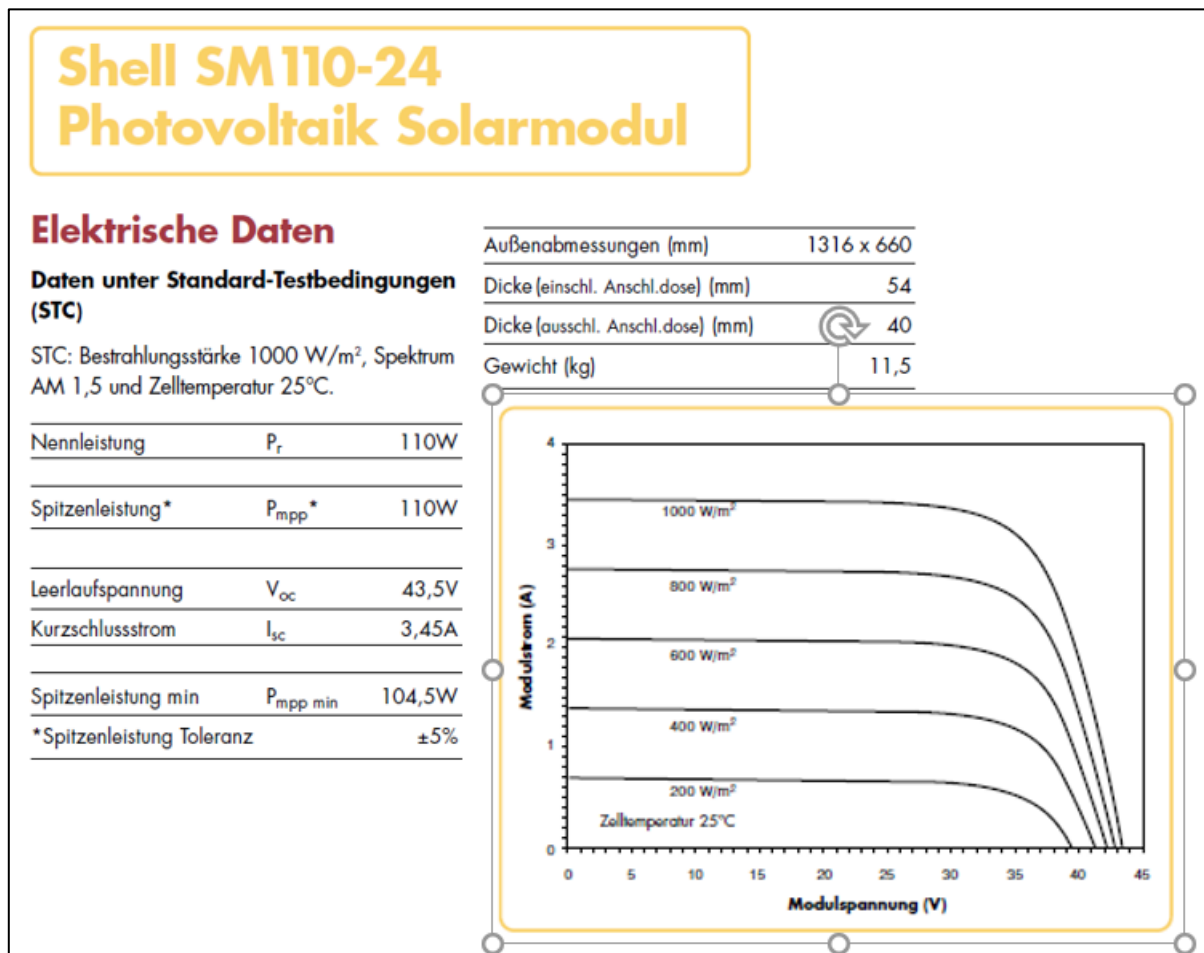


# Modellierung einer Inselanlage mit dem Arduino (nach Lars Möller)

## Aufgabe V1

Im Folgenden sehen Sie Ausschnitte aus dem Datenblatt zu einem Solarmodul.



- Berechnen Sie den **Wirkungsgrad** des Solarmoduls.
- Schätze die Lage des **MPP** bei  $1000 \text{ W/m}^2$  Bestrahlungsstärke (siehe Teilaufgabe d)).
- Bestimmen Sie grob den **Füllfaktor**.
- Skizzieren Sie grob die **U-P-Kennlinie**.
- Bestimmen Sie die Leistung, die das Modul bei einer Beleuchtung von  $400 \text{ W/m}^2$  maximal liefern kann.

## Aufgabe V2

- Begründen Sie, ob mit einem **55 mm x 110 mm** großen Solarmodul (**2V** Leerlaufspannung; **380 mA** Kurzschlussstrom bei  $1000 \text{ W/m}^2$ , ca. **65% Füllfaktor**) ein Lämpchen (**2 V; 0,5 W**) unter optimalen Bedingungen sinnvoll betrieben werden kann.
- Schätzen Sie den **Wirkungsgrad** des Moduls ab.
- Bestimmen Sie die sich beim Anschluss eines **1  $\Omega$** -Widerstandes einstellende Spannung und Stromstärke.

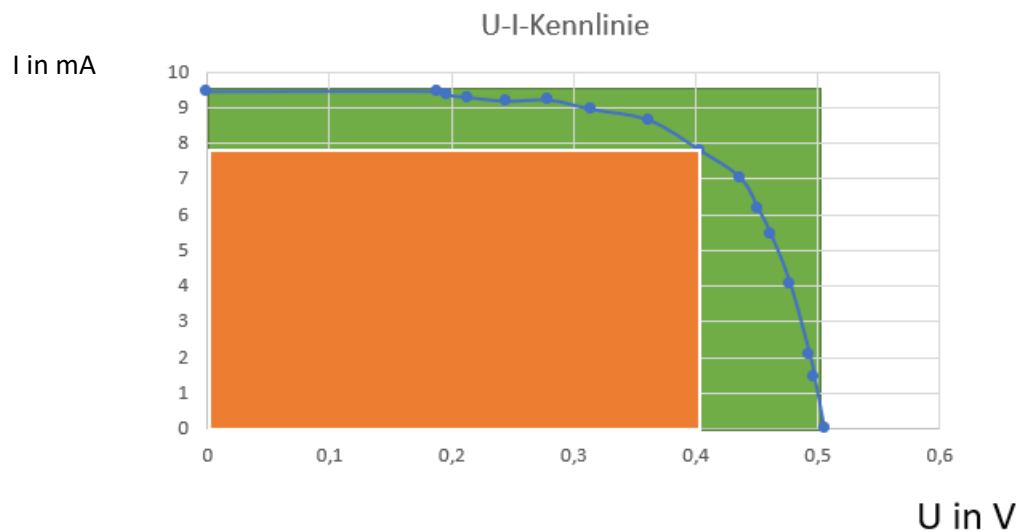
## Berechnung des Wirkungsgrads

Der Wirkungsgrad lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{\text{Bestrahlungsleistung (Leistung am STC)}} \cdot \frac{1m^2}{\text{Abmessungen Solarzelle}}$$

## Der Füllfaktor

Der Füllfaktor ist ein Maß für die Qualität einer Solarzelle. Sie gibt das Verhältnis von dem Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom zum Produkt aus Spannung und Stromstärke im MPP an. Graphisch entspricht dies dem Verhältnis von orangener Fläche zur Summe aus orangener und grüner Fläche.



Je höher der Füllfaktor, desto „eckiger“ die Kurve und desto hochwertiger die Solarzelle. Sehr gute Solarzellen haben einen Füllfaktor von über 80%. Die vermessene Zelle hat einen Füllfaktor von ca. 65%.

## Kennlinie eines Glühlämpchens

Die Kennlinie eines Glühlämpchens entspricht der eines Kaltleiters. Die Steigung muss also abnehmen. Bei einem Lämpchen mit der Betriebsspannung von  $U = 2V$  und der Leistungsaufnahme von  $P = 0,5W$  muss die Kennlinie durch den Punkt  $(2V, 250mA)$  laufen, da  $I = P/U$ .

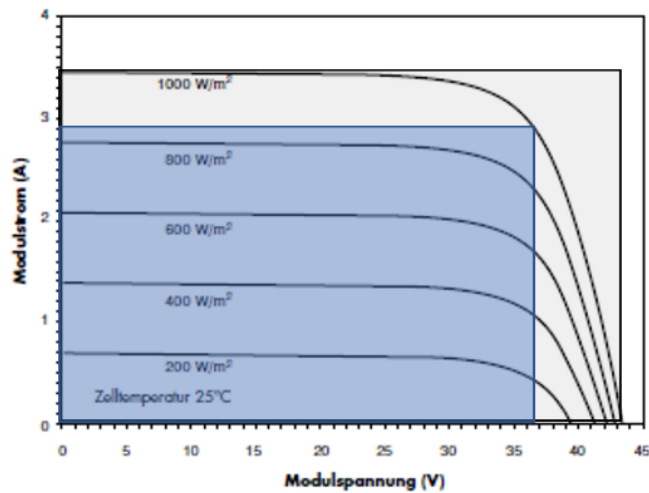
# Lösungen

## Aufgabe V1

a) 
$$\eta = \frac{P_{mpp}}{1000W} \cdot \frac{1m^2}{1,3m \cdot 0,65m} = 0,13$$

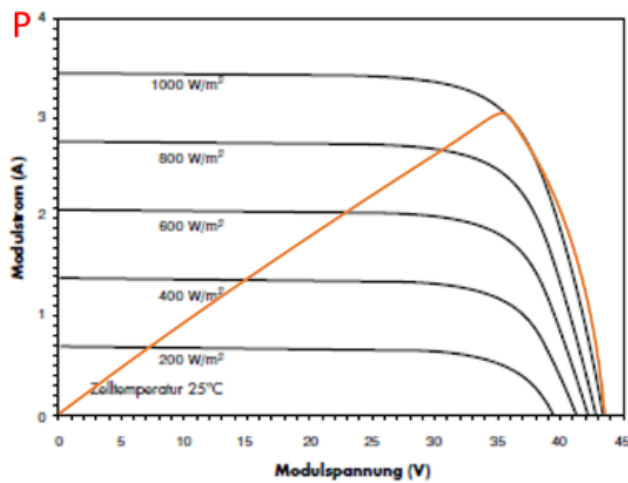
b) Bei ca. 36 bis 37 V (s.u.)

c)

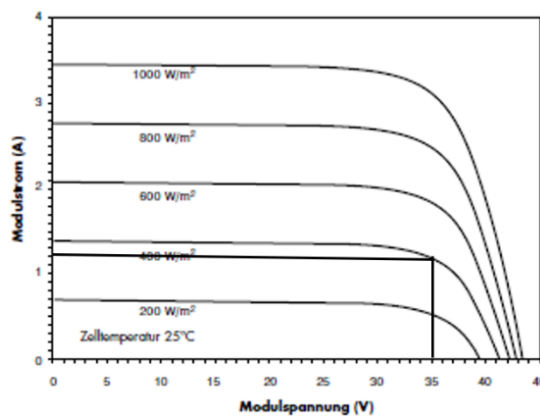


Hellblaue durch grau Fläche → ca 72%

d)



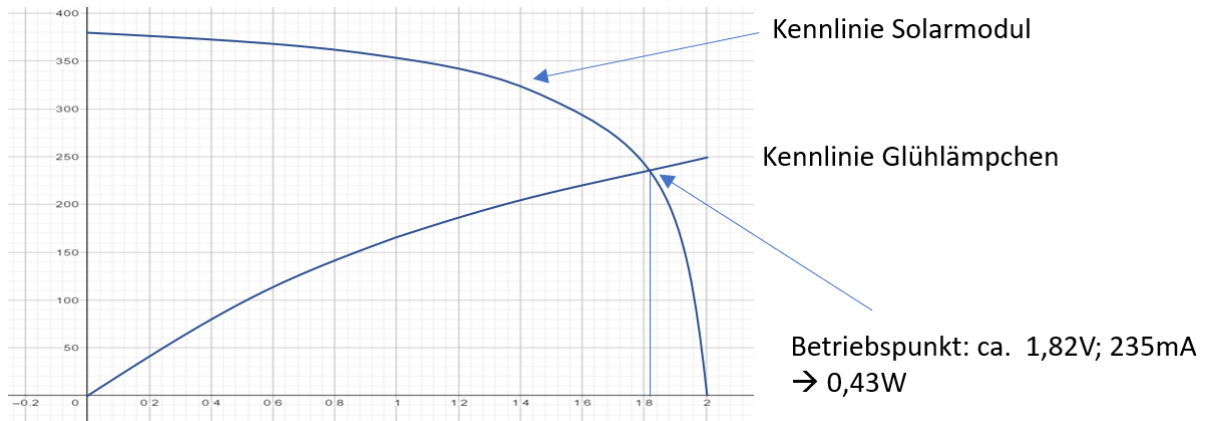
e)



MPP bei ca. 35 V und 1,2 A →  
P=U\*I=42 W

## Aufgabe V2

- a) Mit Hilfe der Angaben kann grob eine U-I-Kennlinie skizziert werden. Die Schnittpunkte mit den Achsen sind über Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung gegeben, die Kurve muss so gebogen sein, dass der Füllfaktor in etwa 65% entspricht. In das gleiche Schaubild kann die Kennlinie eines Glühlämpchen ebenfalls grob eingezeichnet werden. Der Schnittpunkt der beiden Kennlinien ergibt den Arbeitspunkt.

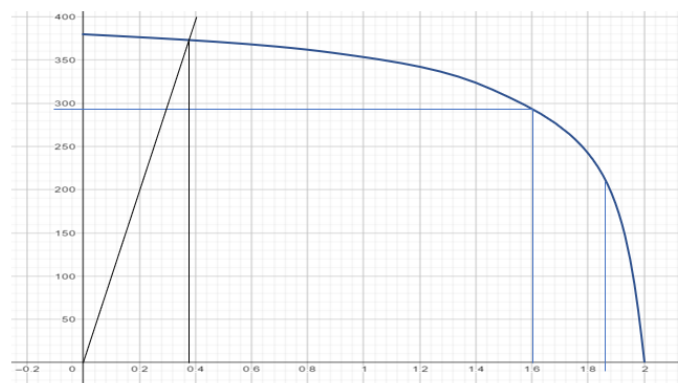


Der Betriebspunkt liegt ca. 10% unter den Nenndaten und damit kann der Betrieb als sinnvoll angesehen werden.

- b) Die maximal entnehmbare Leistung lässt sich über den MPP bestimmen und liegt bei ca. 0,46 W. Die Fläche der Solarzelle beträgt  $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ . Daraus ergibt sich ein Wirkungsgrad von

$$\eta = \frac{P_{\max}}{1000\text{W}} \cdot \frac{1\text{m}^2}{0,0065\text{m}^2} = 0,07$$

- c) Analog zu Aufgabe a) lässt sich die Kennlinie des Ohmschen Widerstandes einzeichnen. (Koordinatenpunkte: 0V und 0A sowie 0,2V und 0,2A)



Daraus ergibt sich eine Spannung von ca. 0,38V bei ca. 370mA

# Projektphase

## Aufgabe P1

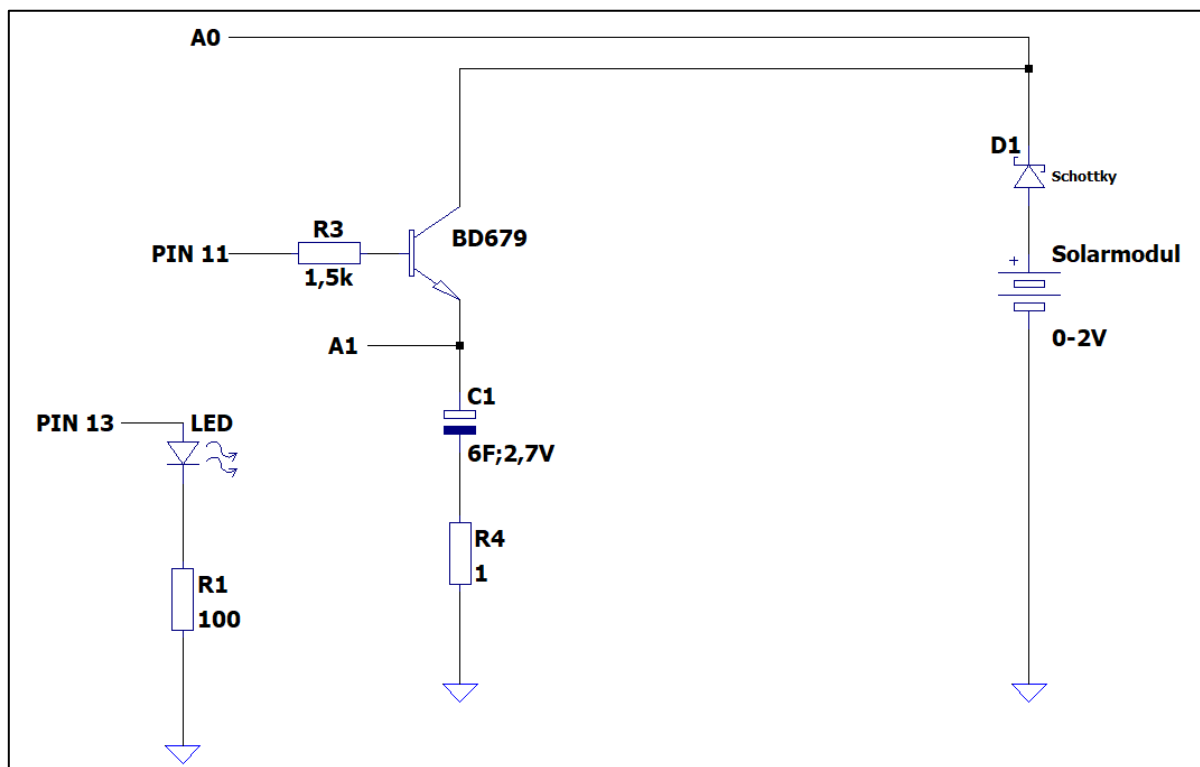
Erstelle einen kleinen Sketch, mit dem du dir die Spannung der Solarzelle über den seriellen Monitor oder ein Display anzeigen lassen kannst.

## Aufgabe P2

Erweitere die Schaltung und Sketch so, dass bei einer Spannung unter 0,3 V eine LED als Zeichen für zu wenig Energie im Netz blinkt und darüber dauerhaft leuchtet.

## Aufgabe P3a

Ohne Speicher lässt sich eine lückenlose Energieversorgung nicht realisieren. Erweitere nun die Schaltung mit einem Goldcap-Kondensator. Baue die Schaltung gemäß Schaltplan auf. ACHTUNG: Achte auf die richtige Polung des Kondensators. Eine falsche Polung könne ihn zerstören.



Der Widerstand R4 (1  $\Omega$ , 1 W) dient als Messwiderstand. Die Spannung, die an ihm abfällt, ist proportional zur Stromstärke, die durch ihn fließt und damit gleichzeitig die Ladestromstärke für den Kondensator ist. Dies ist jedoch nur für Aufgabe 3c nötig.

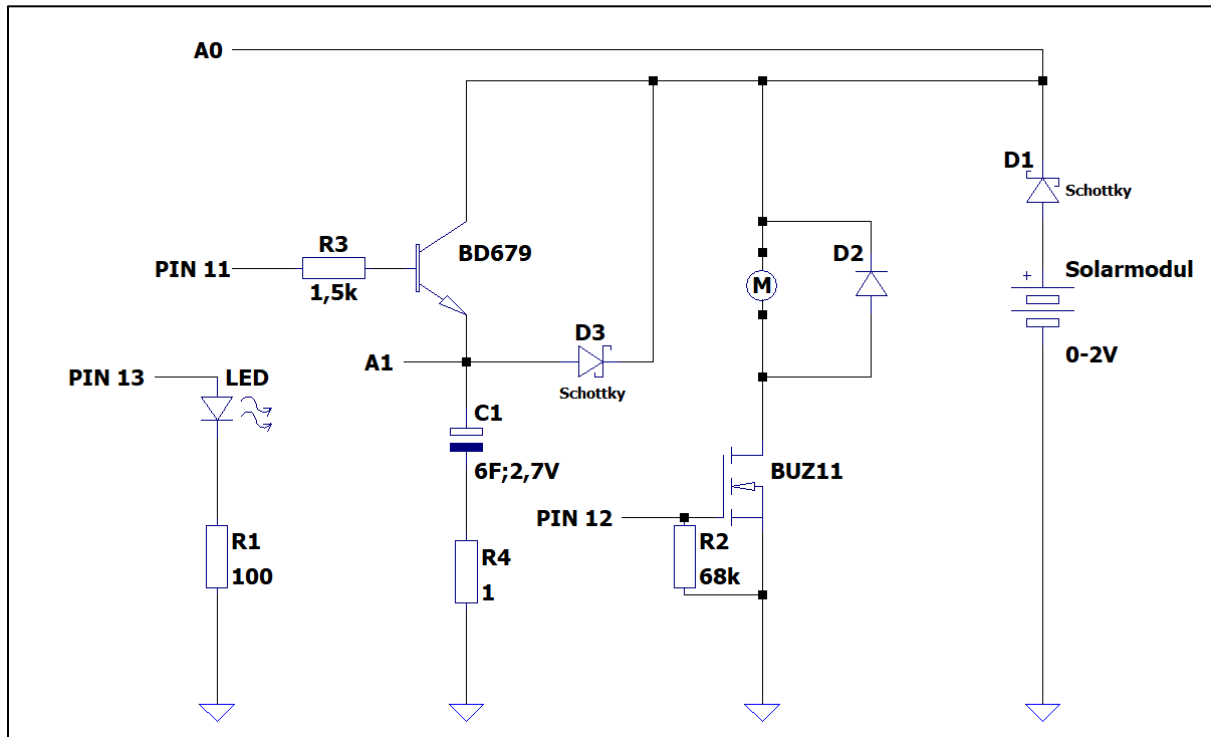
Erweitere das Programm so, dass der Kondensator bei einer Netzspannung von mehr als 0,7 V geladen werden kann, sofern der Benutzer z.B. den Buchstaben „A“ auf der Tastatur eingibt. Mit dem Buchstaben „P“ soll der Ladevorgang gestoppt werden können. Bei weniger als 0,3 V im Netz soll der Ladevorgang automatisch beendet werden.

## Aufgabe P3b

Der Goldcap-Kondensator ist sehr empfindlich gegenüber zu hohen Spannungen und auch in einem richtigen elektrischen Netz geht bei Überspannung so einiges kaputt. Erweitere das Programm soweit, dass bei mehr als 2,5 V alles notabgeschaltet wird und die LED blinkt.

#### Aufgabe P4

Nun kommt die Waschmaschine hinzu und die Schaltung ist vollständig.



Erläutere die Funktionsweise und gehe dabei insbesondere auf die Funktion der Schottky-Diode D3 und der Diode D2 ein.

Das Programm muss nun so abgeändert werden, dass entweder der Akku geladen wird **oder** die Waschmaschine eingeschaltet wird. Sinkt die Spannung unter 0,7 V, darf selbstverständlich weder der Kondensator geladen werden noch die Waschmaschine laufen.

#### Aufgabe P5 (Zusatz)

Schön wäre, wenn

- beim Ladevorgang des Akkus die Spannung nicht zu stark einbricht. Hier kann sowohl in die Hardware oder das Programm eingegriffen werden.
- der Motor beim Einschalten langsam anläuft.
- ein weiterer Stromerzeuger (z.B. Generator) hinzukommt. Aber Achtung: Stellt noch einmal sicher, dass bei mehr als 2,5 V der Kondensator nicht mehr geladen wird.

## Widerstände

Widerstände haben für uns hauptsächlich drei Anwendungsgebiete:

- Sie begrenzen Ströme, um z.B. eine LED oder einen Transistor zu schützen oder um, wie in unserem Projekt, einen Ladestrom zu begrenzen.
- Als Spannungsteiler steuert er z.B. das Verhalten eines Operationsverstärkers oder ermöglicht es, widerstandsabhängige Sensoren auszuwerten.
- Als Pullup- oder Pulldown-Widerstand stellt er z.B. bei geöffneten Schaltern ein verlässliches Potential zur Verfügung.

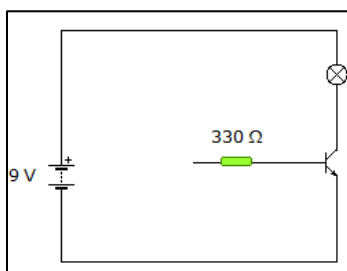
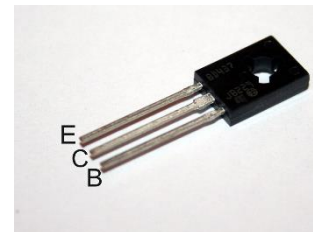
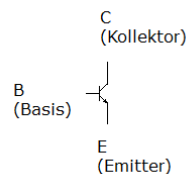
Auch ein Schalter oder Taster kann als Widerstand betrachtet werden mit einem Widerstand von „unendlich“, wenn er geöffnet ist, bzw. einem Widerstand von Null Ohm, wenn er geschlossen ist.

## Dioden

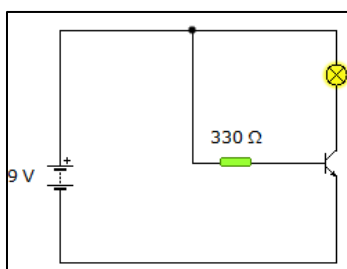
Wie die Solarzelle ist auch die Diode ein Halbleiter und besteht ebenfalls aus einem p-n-Übergang. Richtig in den Stromkreis eingebaut (p zum Pluspol, n zum Minuspol) baut sich die Sperrschicht ab, andersherum gepolt vergrößert sich die Sperrschicht und die Diode sperrt erst recht den Stromfluss. Die Diode macht den Stromfluss also zu einer „Einbahnstraße“. Um das Feld im Inneren abzubauen ist allerdings eine Spannung von ca. 0,7 V nötig (Schwellenspannung). Von der Spannung, die von der Solarzelle produziert wird, würde also nicht mehr viel übrigbleiben. Eine besondere Diode ist die hier verwendete Schottky-Diode. Sie hat einen sperrenden Metall-Halbleiter-Übergang und hat eine deutlich geringere Schwellenspannung von ca. 0,15 V.

## Transistoren

Transistoren sind elektronische Halbleiter-Bauelemente, die zum Verstärken kleiner Ströme oder zum Schalten von in der Regel kleinen Strömen verwendet werden. Im Folgenden soll es nur um den **npn-Transistor** gehen, der in dem Projekt zum Laden des Kondensators eingesetzt wird. Folgende Skizze zeigt einen einfachen Stromkreis, in dem ein Transistor integriert ist, dessen Basis mit vorgeschaltetem Schutzwiderstand aber noch nirgends angeschlossen ist.



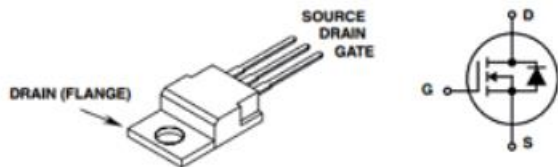
In diesem Fall lässt der Transistor den Strom nicht durch - er sperrt. Die Basis wirkt im Folgenden als Schaltzentrale. Liegt an ihr ein hinreichend großes Potential an schließt er den dargestellten Stromkreis, so dass die Lampe leuchtet. Wird die Basis hingegen mit dem Minuspol verbunden, so sperrt der Transistor den Strom. Vor der Basis sollte immer ein Schutzwiderstand gesetzt sein. Der Transistor an sich bietet dem Strom kaum einen nennenswerten Widerstand, so dass beim direkten Anschluss an den Pluspol der Strom durch den Transistor so groß werden kann, dass er zerstört wird.



Schließt man die Basis nun über den Widerstand an den Pluspol an, leuchtet das Lämpchen, schließt man sie am Minuspol an passiert nichts. Im Projekt stellt der Mikrocontroller das hohe Potential für die Basis zur Verfügung.

## Der Feldeffekttransistor (FET)

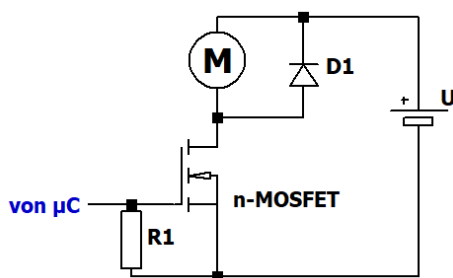
Im Projekt wird ein BUZ11 oder noch besser ein IRLZ 34N als MOSFET verwendet, um den Motor ein- und auszuschalten. Generell hat er große Ähnlichkeiten zu einem Transistor. Auch er kann einen Stromkreis öffnen oder schließen, also als „elektronischer Schalter“ dienen. Der größte Unterschied besteht darin, dass für das Durchschalten beim Transistor ein kleiner Steuerstrom fließen muss (von der Basis zum Emmitter), beim FET reicht es aus, wenn ein Feld am Steuereingang anliegt, daher auch der Name. Die Anschlüsse haben selbstverständlich auch andere Namen: Der Basis des Transistors entspricht Gate, dem Kollektor Drain und dem Emmitter Source. Beim Bauteil selbst in der T220 Bauform sind die sich entsprechenden Anschlüsse spiegelverkehrt angeordnet, wie folgende Abbildung zeigt.



*Auszug aus Datenblatt des BUZ11*

Der BUZ11 ist genaugenommen ein „metal oxide semiconductor field-effect transistor“, zu Deutsch Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor.

Ein einfacher Schaltkreis zum Steuern eines Motors könnte folgendermaßen aussehen:

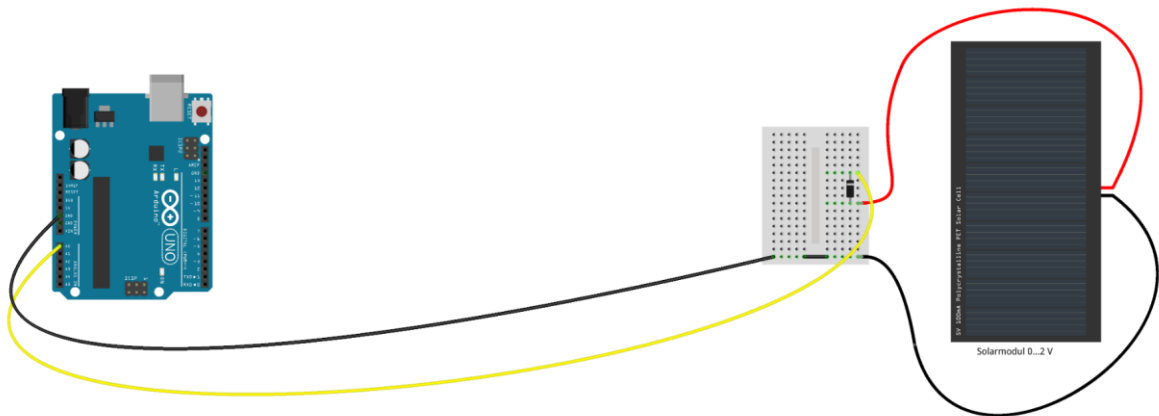


Hier fällt der Widerstand R1 auf, der bei einem Transistor nicht nötig wäre. Wenn der Mikrocontroller das Gate auf ein hohes Potential setzt, können beim Ausschalten über diesen Widerstand die Ladungen abfließen, so dass sich das Feld abbauen kann. Ohne Widerstand wären die Ladungen im Gate gefangen und trotz Ausschaltens seitens des Mikrocontrollers würde der Motor weiterlaufen. R1 zieht also das Potential wieder nach unten und wird daher auch PullDown-Widerstand genannt. Er liegt im hochohmigen Bereich (ca. 60 Kiloohm), so dass die Ladungen zwar das Gate verlassen können, generell jedoch nur ein vernachlässigbarer Strom fließt. Weiter fällt die Diode D1 auf. Durch Induktion kann am unteren Anschluss des Motors ein hohes Potential entstehen, welches über die Diode abgebaut werden kann und wodurch andere Bauteile geschützt werden. Man nennt sie auch Freilaufdiode.



# Lösungshinweise

## Aufgabe 1a:



fritzing

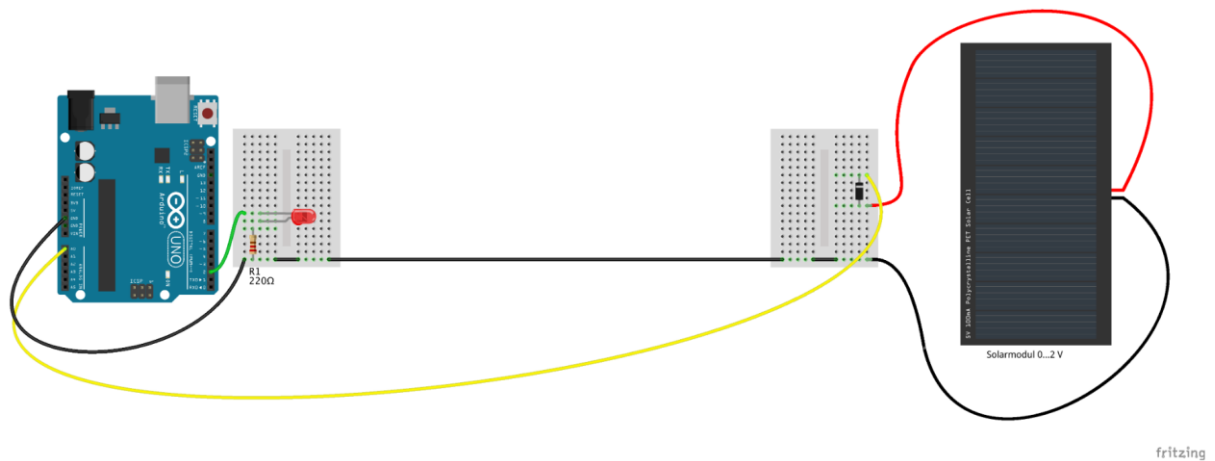
### Möglicher Sketch (mit + von Solarzelle an A0, - an GND):

```
float value; //Variable value als gemessener Wert von A0
float SolarSpannung; //Variable SolarSpannung für die Spannung an der Solarzelle

void setup() {
  Serial.begin(9600); //Start der seriellen Kommunikation
}

void loop() {
  value=analogRead(A0); // Einlesen des Wertes am Eingang A0
  SolarSpannung=value/1023*5; // Umrechnung des Wertes in die Spannung
  Serial.print("Spannung = "); // Ausgabe auf seriellen Monitor
  Serial.print(SolarSpannung,1);
  Serial.print("V");
  Serial.println();
  delay(200);
}
```

## Aufgabe 2:



## Möglicher Sketch (mit LED an PIN13):

```
float value;
float SolarSpannung;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(13, HIGH);
  value=analogRead(A0);
  SolarSpannung=value/1023*5;
  Serial.print("Spannung = ");
  Serial.print(SolarSpannung,1);
  Serial.print("V");
  Serial.println();
  if (SolarSpannung<0.3) {
    digitalWrite(13, HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(13, LOW);
    delay(500);
  }
  delay(200);
}
```



```

        digitalWrite(ledPin, LOW);
        delay(500);
    }

    if (spannung >= untererWert && spannung < grenzeUnten)    //Spannung reicht aus, LED leuchtet
    {
        Serial.println("Es wird wenig elektrische Energie geliefert.");
        Serial.println("Kleinverbraucher koennen aber am Netz bleiben.");
        Serial.println();
        digitalWrite(ledPin, HIGH);
        digitalWrite(akkuPin, LOW);
        flagAkku=0;
        delay(5000);
    }

    if (spannung >= grenzeUnten && spannung < grenzeOben)
    {
        digitalWrite(ledPin, HIGH);
        Serial.println("Es steht genuegend elektrische Energie zur Verfuegung.");
        if (flagAkku==0)
        {
            Serial.println("Wollen Sie einen Akku aufladen, dann geben Sie 'A' ein.");
        }
        if (flagAkku==1)
        {
            Serial.println("Soll der Akkulader ausgeschaltet werden, geben Sie 'P' ein.");
        }
        delay(2000);
        if (Serial.available() > 0) {
            Serial.println();
            incomingByte = Serial.read();    //liest das Zeichen von der Eingabe
            if ((incomingByte == 'A' || incomingByte == 'a') && flagAkku==0)
            {
                digitalWrite(akkuPin, HIGH);
                flagAkku=1;
            }
            if (incomingByte == 'P' || incomingByte == 'p')
            {
                digitalWrite(akkuPin, LOW);
                Serial.println("Akkulader wird ausgeschaltet!");
                flagAkku=0;
            }
        }
        delay(2000);
        Serial.println();
    }
}

```

### Aufgabe 3b

#### Möglicher Sketch:

```
#define ledPin 13
#define akkuPin 11
const int solarPin=0;

const float untererWert=0.3;    //unter 0,3 V kommt Warnsignal
const float grenzeUnten=0.7;    // zwischen 0,3 und 0,7 V kann man eine LED normal leuchten
                                  lassen,
                                  aber keinen Motor oder Akku
                                  anschließen
const float grenzeOben=2.5;    // bei über 2,5 V darf der Akku nicht geladen werden
const float referenceVolts = 5.0; // the default reference on a 5-volt board
char incomingByte; //Zeichen von der Eingabekonsole
int flagAkku=0;    //wenn Akku nicht geladen wird

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  pinMode(akkuPin, OUTPUT);
}

void loop() {

  int value = analogRead(solarPin); // read the value from the sensor
  float spannung = (value / 1023.0) * referenceVolts; // calculate the ratio

  Serial.flush();
  Serial.print("Spannung = ");
  Serial.println(spannung,1);
  Serial.println();
  delay(200);
  if (spannung<untererWert)    //Warnhinweis auf seriellen Monitor und LEDE soll blinken
  {
    Serial.println("Achtung: Nur sehr wenig elektrische Energie im Netz.");
    Serial.println("Alle Grossgeraete muessen abgeschaltet werden.");
    Serial.println();
    digitalWrite(akkuPin, LOW);    //Akkulader ausschalten
    flagAkku=0;
    digitalWrite(ledPin, HIGH);    //LED blinkt mit 1 Hz
    delay(500);
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    delay(500);
  }

  if (spannung>=untererWert && spannung<grenzeUnten)    //Spannung reicht aus, um LED normal
  // leuchten zu lassen
  {
    Serial.println("Es wird wenig elektrische Energie geliefert.");
    Serial.println("Kleinverbraucher koennen aber am Netz bleiben.");
    Serial.println();
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    digitalWrite(akkuPin, LOW);
    flagAkku=0;
    delay(5000);
  }

  if (spannung>=grenzeUnten && spannung<grenzeOben && flagAkku==0)
  {
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    Serial.println("Es steht genuegend elektrische Energie zur Verfuegung.");
    if (flagAkku==0)
    {
      Serial.println("Wollen Sie einen Akku aufladen, dann geben Sie 'A' ein.");
    }
  }
  if (flagAkku==1)
  {
  }
```

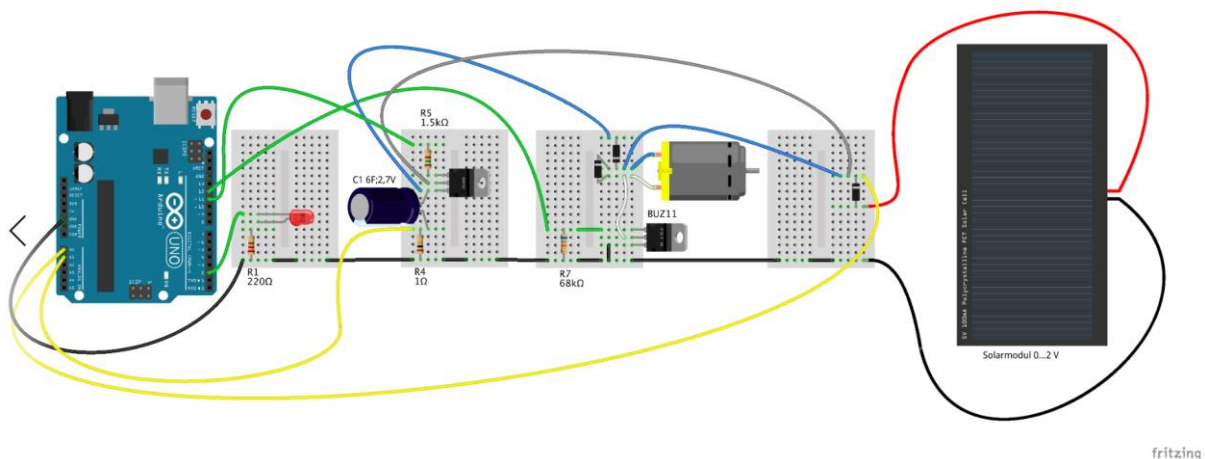
```

        Serial.println("Soll der Akkulader ausgeschaltet werden, geben Sie 'P' ein.");
    }
    delay(2000);
    if (Serial.available() > 0) {
        Serial.println();
        incomingByte = Serial.read(); //liest das Zeichen von der Eingabe
        if ((incomingByte == 'A' || incomingByte == 'a') && flagAkku==0)
        {
            digitalWrite(akkuPin, HIGH);
            flagAkku=1;
        }
        if (incomingByte == 'P' || incomingByte == 'p')
        {
            digitalWrite(akkuPin, LOW);
            Serial.println("Akkulader wird ausgeschaltet!");
            flagAkku=0;
        }
    }
    delay(500);
    Serial.println();
}

if (spannung>=2.5)
{
    Serial.println("Die Netzspannung ist zu hoch.");
    Serial.println("Keine Akkus aufladen!");
    Serial.println();
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    digitalWrite(akkuPin, LOW);
    flagAkku=0;
    delay(2000);
}
}
}

```

#### Aufgabe 4



#### Mögliche Lösung:

Der BUZ11 dient hier als Schalter für den Motor. R2 sorgt dafür, dass das Potential Nullpotential hat, wenn der PIN12 LOW ist. (Pull-Down-Widerstand)

Um Induktionsspitzen abzufangen, ist die Freilaufdiode D2 eingebaut.

Damit der Motor auch die Energie vom GoldCap nutzen kann, ist eine Verbindung vom Pluspol des GoldCaps zum Motor nötig, so dass Solarzelle und GoldCap beide in das Netz einspeisen. Durch die Schottkydioden D1 und D3 kann im Motorbetrieb weder die Solarzelle den GoldCap laden (dann stünde dem Motor ja weniger Energie zur Verfügung), noch der GoldCap die Solarzelle „betreiben“ (auch dann stünde dem Motor weniger Energie zur Verfügung).