Di01-PW6

November 9, 2025

1 PW6 – Strom- und Spannungsquellen

1.1 Solarzellen als Gleichstromquelle

1.1.1 Elektrische Quellen

Ein Stromkreis besteht aus Erzeugern und Verbrauchern elektrischer Energie.
Eine **Spannungsquelle** hält ihre Spannung konstant, unabhängig von der Belastung.
Eine **Stromquelle** hält den Strom konstant, auch wenn sich der Widerstand ändert.
In der Praxis sind beide nicht ideal – sie besitzen einen Innenwiderstand.
Die **Solarzelle** ist eine Gleichstromquelle.

1.1.2 Die Solarzelle

Sie wandelt Lichtenergie in elektrische Energie um (**innerer Photoeffekt**).
Photonen mit Energie $h\nu \leq \varepsilon(G)$ regen Elektronen im Halbleiter an, wodurch frei bewegliche Elektronen und Löcher entstehen.
Durch **Dotierung** entsteht ein **p-n-Übergang** mit einer **Sperrschicht** und einem elektrischen Feld, das die Ladungsträger trennt.

Bei Beleuchtung wirkt die Solarzelle wie eine **Stromquelle parallel zu einer Diode** – ohne Licht nur wie eine Diode.

1.1.3 Strom-Spannungs-Kennlinie

Die Stromquelle liefert einen lichtabhängigen Strom I_l, unabhängig vom Lastwiderstand R_l:

$$I_{ext} = I_L - I_D$$

Zwei wichtige Punkte: - **Kurzschlussstrom** $I(KS) : R_L = 0, U_{ext} = 0$ - **Leerlaufspannung** $U(LL) : R_L = \infty, I_{ext} = 0$

Die elektrische Leistung lautet:

$$P_{ext} = U_{ext} \cdot I_{ext}$$

Das Maximum P_{max} tritt bei $R_{L,max}$ auf.

1.1.4 Kurvenfüllfaktor (CFF)

$$CFF = \frac{P_{max}}{I_{KS} \cdot U_{LL}}$$

Er beschreibt, wie ideal die Kennlinie ist. Gute Solarzellen: $CFF \approx 0.8$–0.9

1.1.5 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis von abgegebener elektrischer zu eingestrahlter Energie. Für optimale Leistung wird der Lastwiderstand elektronisch angepasst (Impedanzwandler).

[59]:
```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Analyse-Toolkit fuer Experiment 1 (Solarzellen als Gleichstromquelle)
Daten werden direkt im Code eingetragen.

Hinweise:
- Kommentare sind auf Deutsch und nur ASCII-Zeichen.
- Grundlage ist PW6: I(U)-Kennlinie, Extrapolation zu I_KS und U_LL,
  Leistungskennlinie P(U), Bestimmung von P_max, R_L,max und CFF.
- Messgroessen:
  U_ext_V   = Klemmenspannung an der Solarzelle
  U_shunt_V = Spannung am Messwiderstand R_I (UI), daraus I = UI / R_I

So trage die Daten ein:
- Fuellen Sie DATA_LOW und DATA_HIGH mit Tupeln (U_ext_V, U_shunt_V)
  in aufsteigender Reihenfolge der U_ext_V (empfohlen).
- Beispiel (nur als Kommentar):
  DATA_LOW = [
      (0.02, 0.095), (0.10, 0.090), (0.20, 0.085), (0.40, 0.070),
      (0.60, 0.055), (0.80, 0.040), (0.95, 0.025), (1.00, 0.015), (1.02, 0.008)
  ]
"""

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from dataclasses import dataclass
from typing import Tuple, Dict, List

# ------------------------------
# Nutzereingaben im Code
# ------------------------------

N_FIT = 5
```

```python
# Messwiderstand fuer Strommessung (R_I). Den genauen Wert vom Gehaeuse␣
↪uebernehmen.
R_I_OHM = 0.5  # anpassen

# Anzahl der Randpunkte fuer lineare Extrapolation
N_FIT = 5  # anpassen je nach Punktdichte

# Rohdaten hier eintragen: Listen aus (U_ext_V, U_shunt_V)
DATA_LOW: List[Tuple[float, float]] = [
    # (U_ext_V, U_shunt_V)  # Beispielwerte entfernen und eigene eintragen
    (0.02, 0.095), (0.10, 0.090), (0.20, 0.085), (0.40, 0.070),
    (0.60, 0.055), (0.80, 0.040), (0.95, 0.025), (1.00, 0.015), (1.02, 0.008)
]

DATA_HIGH: List[Tuple[float, float]] = [
    (0.02, 0.160), (0.10, 0.155), (0.20, 0.150), (0.40, 0.130),
    (0.60, 0.110), (0.80, 0.090), (1.00, 0.070), (1.10, 0.050), (1.15, 0.030)
]

# Dateinamenpraefixe fuer Ausgaben
OUT_PREFIX_LOW = "Schwächere Beleuchtung"
OUT_PREFIX_HIGH = "Stärkere Beleuchtung"


@dataclass
class IVResults:
    U: np.ndarray           # Klemmenspannung
    I: np.ndarray           # Strom
    P: np.ndarray           # Leistung
    RL: np.ndarray          # Lastwiderstand
    I_KS: float             # Kurzschlussstrom (Extrapolation U->0)
    U_LL: float             # Leerlaufspannung (Extrapolation I->0)
    P_max: float            # Maximale Leistung
    RL_at_Pmax: float       # Lastwiderstand am Leistungsmaksimum
    CFF: float              # Kurvenfuellfaktor


# ------------------------------
# Hilfsfunktionen
# ------------------------------
def tuples_to_arrays(data: List[Tuple[float, float]]) -> Tuple[np.ndarray, np.
↪ndarray]:
    """
    Wandelt Liste von (U_ext_V, U_shunt_V) in Arrays U, UI um.
    Sortiert nach U aufsteigend, falls noetig.
    """
```

```
    if len(data) == 0:
        raise ValueError("Keine Messdaten eingetragen. Bitte DATA_LOW und␣
↪DATA_HIGH befuellen.")
    arr = np.array(data, dtype=float)
    if arr.ndim != 2 or arr.shape[1] != 2:
        raise ValueError("Datenformat ungueltig. Erwartet Liste von (U_ext_V,␣
↪U_shunt_V).")
    U = arr[:, 0]
    UI = arr[:, 1]
    idx = np.argsort(U)
    return U[idx], UI[idx]


def compute_current(UI: np.ndarray, R_I: float) -> np.ndarray:
    """
    I = U_shunt / R_I
    """
    return UI / R_I


def linear_extrapolation_x0(x: np.ndarray, y: np.ndarray) -> float:
    """
    Lineare Regression y = a*x + b und Rueckgabe von y(x=0) = b.
    """
    A = np.vstack([x, np.ones_like(x)]).T
    a, b = np.linalg.lstsq(A, y, rcond=None)[0]
    return b


def linear_extrapolation_y0(x: np.ndarray, y: np.ndarray) -> float:
    """
    Lineare Regression y = a*x + b und Rueckgabe von x bei y=0: x0 = -b/a.
    """
    A = np.vstack([x, np.ones_like(x)]).T
    a, b = np.linalg.lstsq(A, y, rcond=None)[0]
    if np.isclose(a, 0.0):
        return np.nan
    return -b / a


def compute_power(U: np.ndarray, I: np.ndarray) -> np.ndarray:
    return U * I


def compute_RL(U: np.ndarray, I: np.ndarray) -> np.ndarray:
    """
    RL = U / I, mit Behandlung der Faelle nahe I=0.
```

```
    """
    RL = np.full_like(U, np.nan, dtype=float)
    nonzero = np.abs(I) > 1e-12
    RL[nonzero] = U[nonzero] / I[nonzero]
    return RL


def find_pmax(U: np.ndarray, I: np.ndarray, P: np.ndarray) -> Tuple[float,␣
↪float]:
    """
    Findet P_max und den zugehoerigen RL.
    """
    idx = np.nanargmax(P)
    P_max = float(P[idx])
    RL_at = np.nan
    if np.abs(I[idx]) > 1e-12:
        RL_at = float(U[idx] / I[idx])
    return P_max, RL_at

def _auto_n_fit(n_fit_wish: int, n_points:int) -> int:
    """
    Waehlt eine sinnvolle Anzahl Randpunkte fuer lineare Extrapolation.
    Regeln:
    - mindestens 2
    - maximal n_points // 3 (damit die Randbereiche nicht zu gross sind)
    - falls sehr wenige Punkte vorhanden sind, nimmt die Funktion automatisch 2
    """
    if n_points < 4:
        # Mit <4 Punkten ist eine zuverlaessige Extrapolation nicht sinnvoll
        raise ValueError("Zu wenige Datenpunkte insgesamt. Bitte mehr Messwerte␣
↪aufnehmen.")
    n = min(n_fit_wish, max(2, n_points // 3))
    n = max(2, n)  # Sicherheitsnetz
    return n

def eval_dataset(U: np.ndarray, I: np.ndarray, n_fit_wish: int) -> Dict[str,␣
↪float]:
    """
    Extrapolationen:
    - I_KS: lineare Extrapolation der ersten n_fit Punkte auf U=0
    - U_LL: lineare Extrapolation der letzten  n_fit Punkte auf I=0
    """
    n_points = len(U)
    n_fit = _auto_n_fit(n_fit_wish, n_points)

    U_lo = U[:n_fit]
    I_lo = I[:n_fit]
```

```
    I_KS = float(linear_extrapolation_x0(U_lo, I_lo))
    U_hi = U[-n_fit:]
    I_hi = I[-n_fit:]
    U_LL = float(linear_extrapolation_y0(U_hi, I_hi))
    return {"I_KS": I_KS, "U_LL": U_LL}


def compute_cff(P_max: float, I_KS: float, U_LL: float) -> float:
    """
    CFF = P_max / (I_KS * U_LL)
    """
    denom = I_KS * U_LL
    if np.isclose(denom, 0.0):
        return np.nan
    return float(P_max / denom)


def analyze_from_tuples(data_tuples: List[Tuple[float, float]],
                        R_I: float,
                        n_fit: int,
                        out_prefix: str) -> IVResults:
    """
    Vollanalyse fuer einen Datensatz:
    - Umwandlung der Tupel in Arrays
    - Strom berechnen, Sortierung sicherstellen
    - Extrapolation I_KS und U_LL
    - P(U) und RL(U)
    - P_max, RL_at_Pmax, CFF
    """
    U, UI = tuples_to_arrays(data_tuples)
    I = compute_current(UI, R_I)
    P = compute_power(U, I)
    RL = compute_RL(U, I)

    ex = eval_dataset(U, I, n_fit)
    I_KS = ex["I_KS"]
    U_LL = ex["U_LL"]

    P_max, RL_at = find_pmax(U, I, P)
    idx_max = int(np.nanargmax(P))
    U_at_Pmax = float(U[idx_max])
    I_at_Pmax = float(I[idx_max])
    CFF = compute_cff(P_max, I_KS, U_LL)

    # Export Tabellen
    df_out = pd.DataFrame({
        "U_V": U,
```

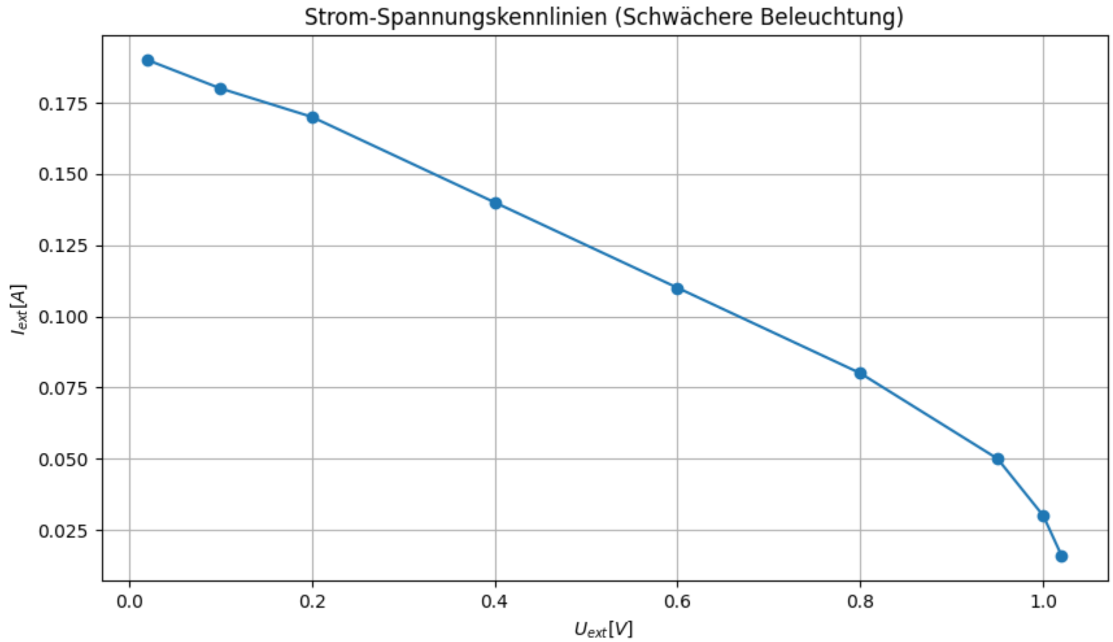
```
        "U_shunt_V": UI,
        "I_A": I,
        "P_W": P,
        "RL_Ohm": RL
    })
    df_out.to_csv(f"{out_prefix}_iv_processed.csv", index=False)

    # Plots (je Plot separat, keine Farbangaben)
    fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1,  figsize=(10, 12))
    fig.suptitle(f"{out_prefix}")
    ax1.plot(U, I, marker="o")
    ax1.set(xlabel=r"$U_{ext} [V]$", ylabel=r"$I_{ext} [A]$")
    #ax1.xlabel("U_ext (V)")
    #ax1.ylabel("I_ext (A)")
    ax1.set_title(f"Strom-Spannungskennlinien ({out_prefix})")
    ax1.grid(True)


    ax2.plot(U, P, marker="o")
    ax2.set(xlabel=r"$U_{ext} [V]$", ylabel=r"$P_{ext} [W]$")
    #ax2.xlabel("U_ext (V)")
    #ax2.ylabel("P_ext (W)")
    ax2.set_title(f"Leistungskurve ({out_prefix})")
    ax2.grid(True)
    ax2.plot([U_at_Pmax], [P_max], marker="o", markersize=10, color="green")
    ax2.axvline(U_at_Pmax, linestyle="--")
    ax2.axhline(P_max, linestyle="--")
    ax2.annotate(
        r"$P_{max} = $" + f"{P_max:.4g} W\nU = {U_at_Pmax:.4g} V",
        (U_at_Pmax, P_max),
        textcoords="offset points",
        xytext=(15, -40),
        ha="left",
        va="bottom"
    )

    # Zusammenfassung
    summary = {
        "I_KS_A": I_KS,
        "U_LL_V": U_LL,
        "P_max_W": P_max,
        "RL_at_Pmax_Ohm": RL_at,
        "CFF": CFF
    }
    pd.Series(summary).to_json(f"{out_prefix}_summary.json", indent=2)

    return IVResults(
```

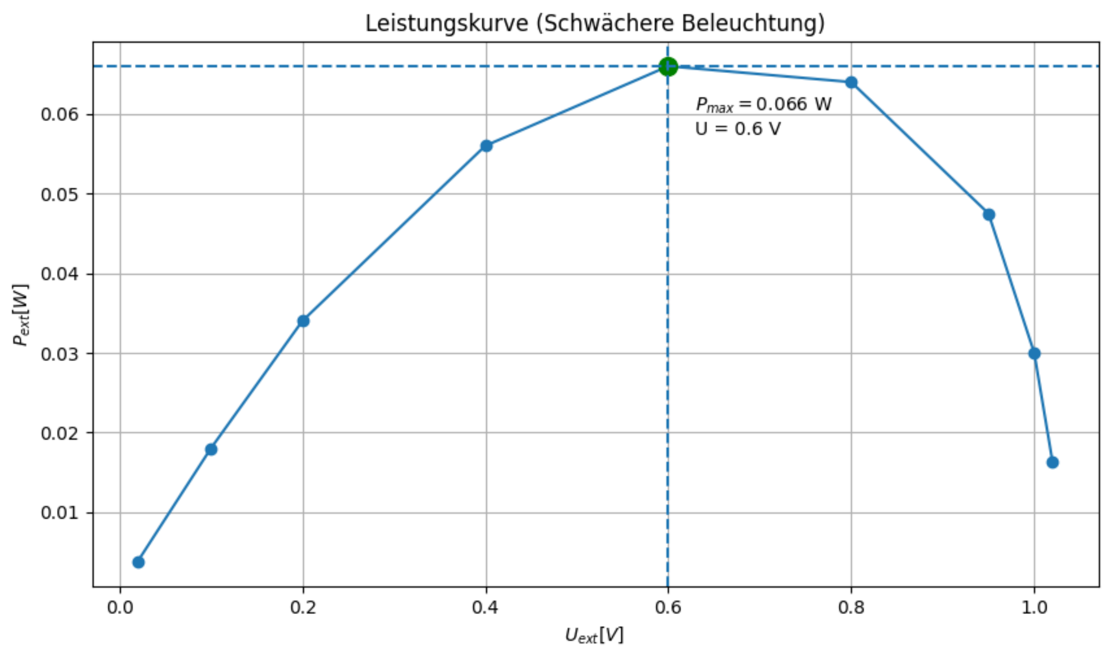
```
        U=U,
        I=I,
        P=P,
        RL=RL,
        I_KS=I_KS,
        U_LL=U_LL,
        P_max=P_max,
        RL_at_Pmax=RL_at,
        CFF=CFF
    )


# ------------------------------
# Hauptablauf
# ------------------------------
if __name__ == "__main__":
    # Pruefungen
    if len(DATA_LOW) == 0 or len(DATA_HIGH) == 0:
        raise SystemExit(
            "Bitte Messdaten in DATA_LOW und DATA_HIGH eintragen und das Skript␣
 ↪erneut ausfuehren."
        )

    if R_I_OHM <= 0:
        raise SystemExit("R_I_OHM muss > 0 sein.")

    if N_FIT < 2:
        raise SystemExit("N_FIT sollte mindestens 2 sein.")

    # Analyse fuer beide Beleuchtungsstaerken
    res_low = analyze_from_tuples(DATA_LOW, R_I_OHM, N_FIT, OUT_PREFIX_LOW)
    res_high = analyze_from_tuples(DATA_HIGH, R_I_OHM, N_FIT, OUT_PREFIX_HIGH)

    # Vergleichsausgabe auf Konsole
    print(f"Zusammenfassung ({OUT_PREFIX_LOW}):")
    print(f"I_KS  = {res_low.I_KS:.6g} A")
    print(f"U_LL  = {res_low.U_LL:.6g} V")
    print(f"P_max = {res_low.P_max:.6g} W")
    print(f"RL@Pmax = {res_low.RL_at_Pmax:.6g} Ohm")
    print(f"CFF   = {res_low.CFF:.6g}")
    print()

    print(f"Zusammenfassung ({OUT_PREFIX_HIGH}):")
    print(f"I_KS  = {res_high.I_KS:.6g} A")
    print(f"U_LL  = {res_high.U_LL:.6g} V")
    print(f"P_max = {res_high.P_max:.6g} W")
    print(f"RL@Pmax = {res_high.RL_at_Pmax:.6g} Ohm")
```

```python
    print(f"CFF    = {res_high.CFF:.6g}")
    print()

    # Optionaler Vergleichsplot
    plt.figure( figsize=(10, 6))
    plt.plot(res_low.U, res_low.I, marker="o", label=OUT_PREFIX_LOW)
    plt.plot(res_high.U, res_high.I, marker="s", label=OUT_PREFIX_HIGH)
    plt.xlabel(r"$U_{ext} [V]$")
    plt.ylabel(r"$I_{ext} [A]$")
    plt.title("Vergleich I-U Kennlinien")
    plt.grid(True)
    plt.legend()
    plt.tight_layout()
    plt.show()
```

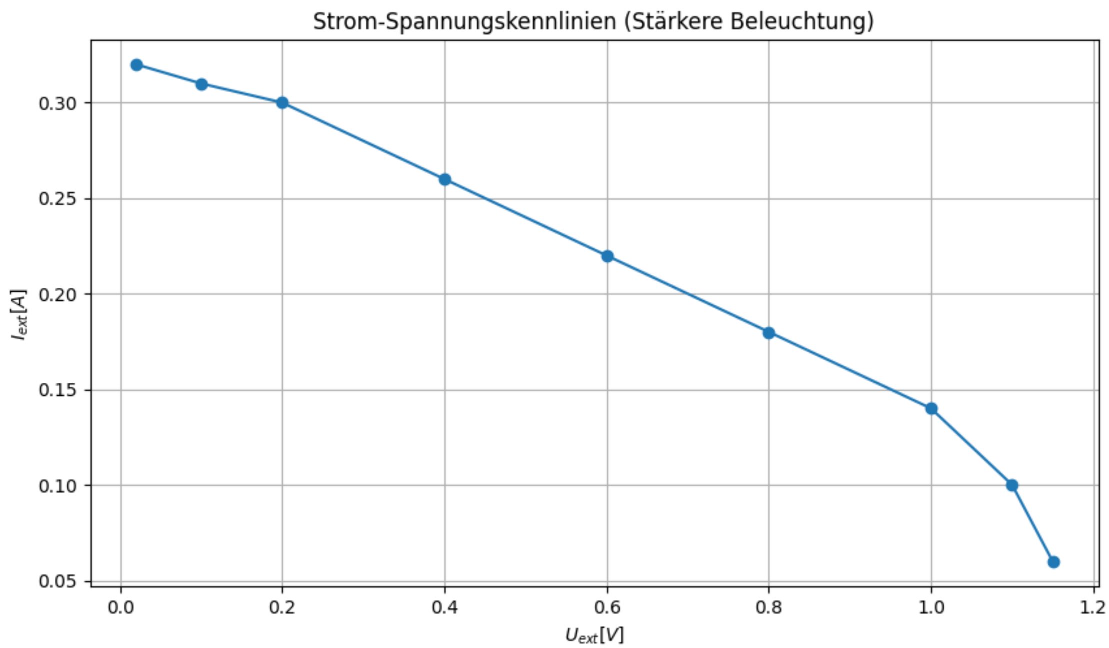
```
Zusammenfassung (Schwächere Beleuchtung):
I_KS   = 0.191803 A
U_LL   = 1.0582 V
P_max = 0.066 W
RL@Pmax = 5.45455 Ohm
CFF    = 0.325178

Zusammenfassung (Stärkere Beleuchtung):
I_KS   = 0.321803 A
U_LL   = 1.27778 V
P_max = 0.144 W
RL@Pmax = 4.44444 Ohm
CFF    = 0.3502
```

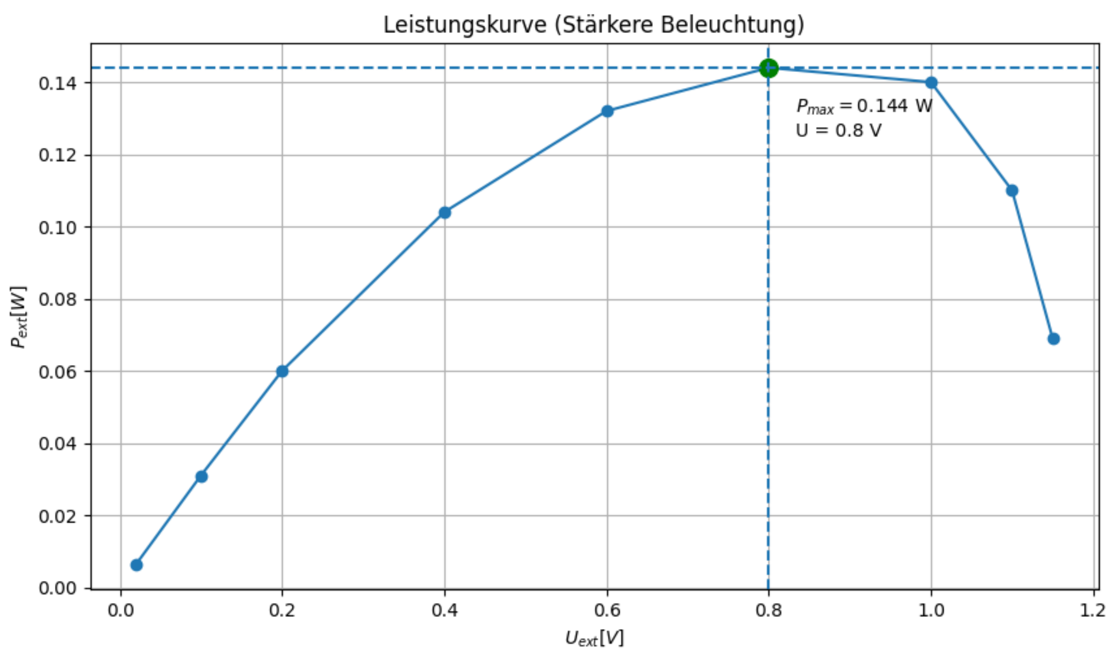
Schwächere Beleuchtung

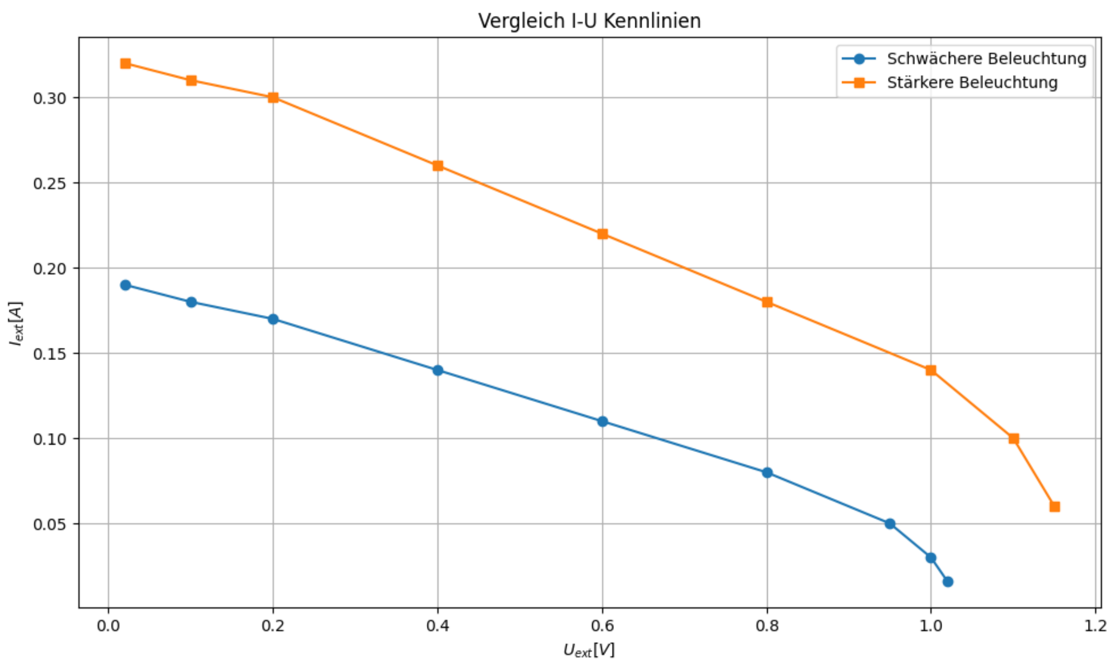




Stärkere Beleuchtung







1.2 Reale Spannungsquelle

1.2.1 Prinzip

Eine ideale Spannungsquelle hält ihre Spannung unabhängig von der entnommenen Stromstärke konstant.
Reale Spannungsquellen zeigen eine Abnahme der Klemmenspannung bei Belastung.
Modell: ideale Spannungsquelle U_0 **in Serie** mit einem Innenwiderstand R_i.

1.2.2 Zusammenhang von Spannung und Strom

Für den Stromkreis mit Lastwiderstand R_L:

$$I = \frac{U_0}{R_i + R_L}$$

Am Innenwiderstand fällt die Spannung $I\,R_i$ ab, daher:

$$U_{\mathrm{KL}} = U_0 - I\,R_i$$

Folgen: - U_{KL} sinkt **linear** mit wachsendem I.
- Nur bei $I = 0$ (Leerlauf, $R_L \to \infty$) gilt $U_{\mathrm{KL}} = U_0$.

1.2.3 Bestimmung von R_i und U_0

Misst man die Kennlinie $U_{\mathrm{KL}}(I)$, erhält man eine fallende Gerade.
- Steigung $-R_i$ (Betrag der Steigung entspricht R_i).
- Achsenabschnitt bei $I = 0$ liefert U_0.

[60]:

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Auswertung: Reale Spannungsquelle (Experiment 2, PW6)
- Keine Datei-Exporte: nur Konsole und angezeigte Diagramme
- Linearer Fit U_KL(I) im (auto-)gewaehlten linearen Bereich
- Bestimmung von R_i und U_0 mit Standardfehlern
- Optionaler Vergleich mit gemessener Leerlaufspannung\

Hinweis zum Modell:
U_KL = U_0 - I * R_i  -> Fit von y = a*x + b mit a ~ -R_i, b ~ U_0
"""
from typing import Optional
# ------------------------------
# Nutzereingaben
# ------------------------------

# Messdaten als Liste von Tupeln: (I_A, U_KL_V)
# Reihenfolge egal; das Skript sortiert nach I
DATA: List[Tuple[float, float]] = [
    # Beispielwerte; bitte durch eigene Messreihe ersetzen
    # (I_A, U_KL_V)
    (0.00, 1.595),
    (0.010, 1.590),
    (0.020, 1.580),
    (0.030, 1.565),
    (0.040, 1.545),
    (0.050, 1.520),
    (0.060, 1.490),
    (0.070, 1.455),
    (0.080, 1.410),
    (0.090, 1.355),
]

# Optional: gemessene Leerlaufspannung (Taster offen, I=0)
U0_OPEN_CIRCUIT_V: Optional[float] = 1.600  # oder None, wenn nicht gemessen

# Fit-Steuerung:
# Entweder expliziten Bereich in A angeben ...
FIT_I_MIN: Optional[float] = None   # z. B. 0.01
FIT_I_MAX: Optional[float] = None   # z. B. 0.07
# ... oder automatisch den "besten" linearen Abschnitt suchen
```

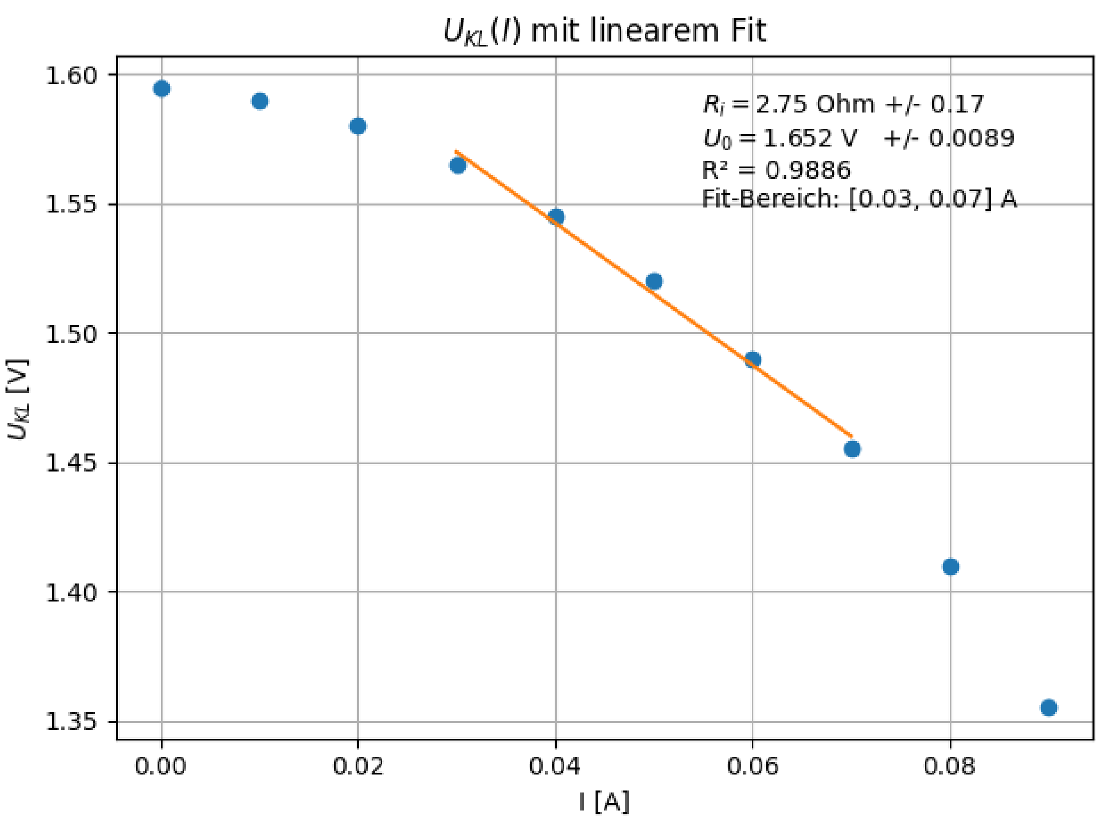
```
AUTO_WINDOW_MIN_POINTS = 5  # minimale Punktzahl fuer die automatische
↪Fenstersuche


# ------------------------------
# Hilfsfunktionen
# ------------------------------
def sort_by_current(data):
    arr = np.array(data, dtype=float)
    idx = np.argsort(arr[:, 0])
    return arr[idx, 0], arr[idx, 1]  # I, U

def linear_fit_with_errors(x, y):
    """
    Linearer Fit y = a*x + b mit Standardfehlern.
    Rueckgabe: a, b, s_a, s_b, R2
    """
    x = np.asarray(x, dtype=float)
    y = np.asarray(y, dtype=float)
    n = len(x)
    if n < 2:
        raise ValueError("Zu wenige Punkte fuer linearen Fit.")
    x_mean = np.mean(x)
    y_mean = np.mean(y)
    Sxx = np.sum((x - x_mean)**2)
    Sxy = np.sum((x - x_mean)*(y - y_mean))
    a = Sxy / Sxx
    b = y_mean - a * x_mean
    # Residuen und Varianz
    y_fit = a * x + b
    resid = y - y_fit
    RSS = np.sum(resid**2)
    s2 = RSS / (n - 2) if n > 2 else 0.0
    # Standardfehler (klassische Formeln)
    s_a = np.sqrt(s2 / Sxx) if Sxx > 0 else np.nan
    s_b = np.sqrt(s2 * (1.0/n + (x_mean**2) / Sxx)) if Sxx > 0 else np.nan
    # Bestimmtheitsmass
    TSS = np.sum((y - y_mean)**2)
    R2 = 1.0 - RSS / TSS if TSS > 0 else np.nan
    return a, b, s_a, s_b, R2, y_fit, resid

def choose_window_auto(I, U, min_points=5):
    """
    Sucht das Fenster mit maximalem R^2 fuer einen linearen Fit.
    Rueckgabe: slice(start, end_exclusive)
    """
    n = len(I)
```

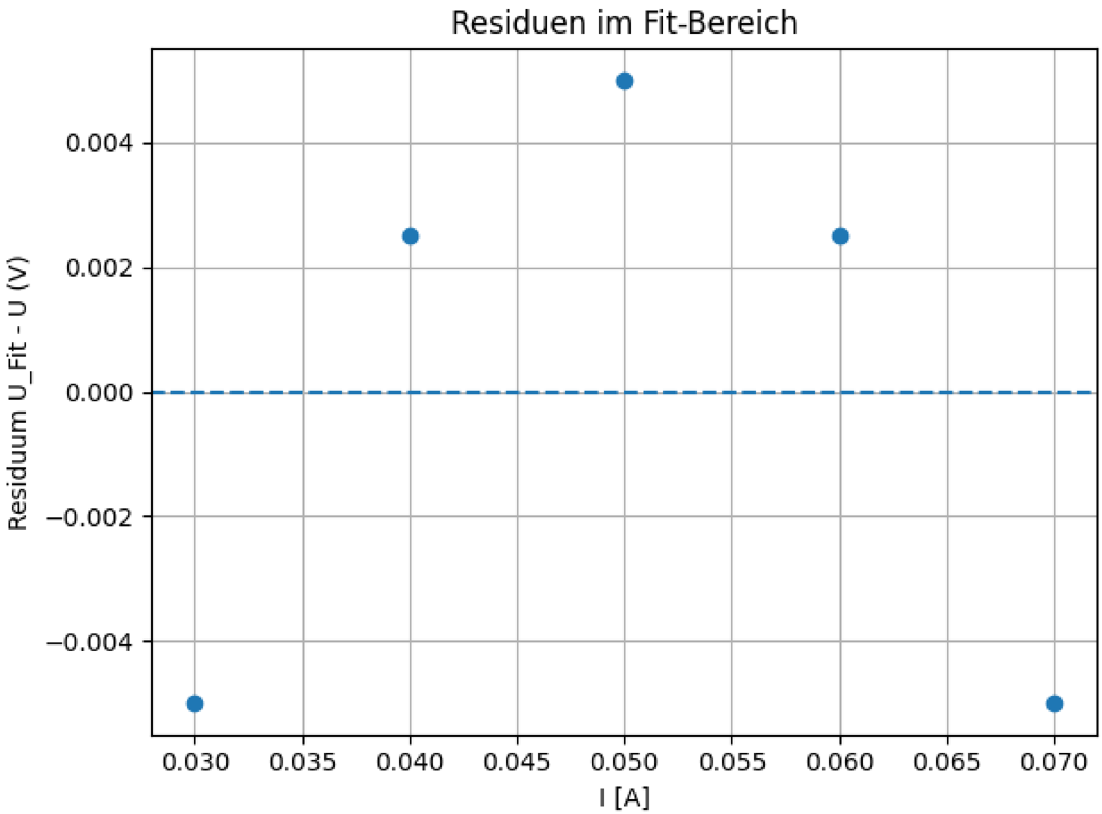
```
    if n < min_points:
        raise ValueError("Zu wenige Datenpunkte fuer die automatische␣
↪Fenstersuche.")
    best = (None, -np.inf, None)  # (slice, R2, (a,b,s_a,s_b))
    for start in range(0, n - min_points + 1):
        for end in range(start + min_points, n + 1):
            x = I[start:end]
            y = U[start:end]
            a, b, s_a, s_b, R2, _, _ = linear_fit_with_errors(x, y)
            if np.isfinite(R2) and R2 > best[1]:
                best = (slice(start, end), R2, (a, b, s_a, s_b))
    return best[0]  # bester Slice

def pick_fit_indices(I, fit_min, fit_max, auto_min_points):
    if fit_min is not None and fit_max is not None:
        sel = (I >= fit_min) & (I <= fit_max)
        idx = np.where(sel)[0]
        if len(idx) < 2:
            raise ValueError("Zu wenige Punkte im gewaehlten I-Bereich fuer den␣
↪Fit.")
        return slice(idx[0], idx[-1] + 1), "manuell"
    # automatisch
    sl = choose_window_auto(I, U, min_points=auto_min_points)
    return sl, "auto"

# -----------------------------
# Hauptauswertung
# -----------------------------
if __name__ == "__main__":
    # Daten vorbereiten
    I, U = sort_by_current(DATA)

    # Fit-Bereich waehlen (manuell oder auto)
    fit_slice, fit_mode = pick_fit_indices(I, FIT_I_MIN, FIT_I_MAX,␣
↪AUTO_WINDOW_MIN_POINTS)
    I_fit = I[fit_slice]
    U_fit = U[fit_slice]

    # Linearer Fit U = a*I + b
    a, b, s_a, s_b, R2, U_fit_vals, resid = linear_fit_with_errors(I_fit, U_fit)

    # Modellabbildung auf R_i und U_0
    # U_KL = U_0 - I * R_i -> a = dU/dI = -R_i, b = U_0
    R_i = -a
    s_Ri = s_a  # gleiche Groesse, Vorzeichenwechsel egal fuer die Unsicherheit
    U_0 = b
    s_U0 = s_b
```

```
# Ausgabe fuer Protokoll
print("=== Auswertung: Reale Spannungsquelle (PW6, Teil 2) ===")
print(f"Fit-Bereich: I in [{I_fit.min():.6g}, {I_fit.max():.6g}] A,  Punkte: {len(I_fit)}")
print(f"Lineares Modell: U_KL = U_0 - I * R_i  (entspricht  U = a*I + b)")
print(f"Fit-Parameter:")
print(f"  a = {a:.6g} V/A,  b = {b:.6g} V,  R^2 = {R2:.5f}")
print("\nErgebnisse:")
print(f"  Innenwiderstand  R_i = {R_i:.6g} Ohm  +/- {s_Ri:.2g} Ohm ")
print(f"  Quellenspannung  U_0 = {U_0:.6g} V    +/- {s_U0:.2g} V")

if U0_OPEN_CIRCUIT_V is not None:
    delta = U0_OPEN_CIRCUIT_V - U_0
    print(f"\nVergleich mit Leerlaufspannung:  U_open = {U0_OPEN_CIRCUIT_V:.6g} V")
    print(f"  Abweichung U_open - U_0 = {delta:.6g} V")

# Diagramm 1: U_KL(I) mit Fit (nur ein Plot, keine Farben vorgegeben)
plt.figure()
plt.plot(I, U, marker="o", linestyle="")
# Fit-Linie ueber dem Fitbereich
I_line = np.linspace(I_fit.min(), I_fit.max(), 100)
U_line = a * I_line + b
plt.plot(I_line, U_line, linestyle="-")
plt.xlabel("I [A]")
plt.ylabel(r"$U_{KL}$ [V]")
plt.title(r"$U_{KL}(I)$ mit linearem Fit")
plt.grid(True)
# Textbox mit Ergebnissen
txt = (r"$R_i = $" + f"{R_i:.4g} Ohm +/- {s_Ri:.2g}\n"
       r"$U_0 =$"+ f"{U_0:.4g} V   +/- {s_U0:.2g}\n"
       f"R² = {R2:.4f}\n"
       f"Fit-Bereich: [{I_fit.min():.3g}, {I_fit.max():.3g}] A")
plt.annotate(txt, xy=(0.6, 0.95), xycoords="axes fraction",
             ha="left", va="top")

plt.tight_layout()
plt.show()

# Diagramm 2: Residuenplot zur Pruefung der Linearitaet
plt.figure()
plt.plot(I_fit, resid, marker="o", linestyle="")
plt.axhline(0.0, linestyle="--")
plt.xlabel("I [A]")
plt.ylabel("Residuum U_Fit - U (V)")
plt.title("Residuen im Fit-Bereich")
```

```python
    plt.grid(True)
    plt.tight_layout()
    plt.show()
```

```
=== Auswertung: Reale Spannungsquelle (PW6, Teil 2) ===
Fit-Bereich: I in [0.03, 0.07] A,  Punkte: 5
Lineares Modell: U_KL = U_0 - I * R_i  (entspricht  U = a*I + b)
Fit-Parameter:
  a = -2.75 V/A,  b = 1.6525 V,  R^2 = 0.98856

Ergebnisse:
  Innenwiderstand  R_i = 2.75 Ohm  +/- 0.17 Ohm
  Quellenspannung  U_0 = 1.6525 V    +/- 0.0089 V

Vergleich mit Leerlaufspannung:  U_open = 1.6 V
  Abweichung U_open - U_0 = -0.0525 V
```




Residuen im Fit-Bereich
0.004
0.002
0.000
−0.002
−0.004
Residuum U_Fit - U (V)
0.030
0.035
0.040
0.045
0.050
0.055
0.060
0.065
0.070
I [A]