

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK

Übungsnummer: 14

Übungstitel: Erneuerbare Energien (TU)

Betreuer: Elena Steinwender

Gruppennummer: 42

Name: Nico Eisner

Name: Philip Waldl

Mat. Nr.: 12214121

Mat. Nr.: 12214120

Datum der Übung: 10.11.2023

WS 2023/2024

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	3
1.1 Photovoltaik	3
1.2 Brennstoffzelle	3
1.3 Windkraft	3
2 Voraussetzungen & Grundlagen	3
2.1 Photovoltaik	3
2.2 Brennstoffzelle	4
2.3 Windkraft	4
3 Versuchsanordnung	6
4 Geräteliste	9
5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse	9
5.1 Photovoltaik	9
5.2 Brennstoffzelle	10
5.3 Windkraft	12
6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse	14
6.1 Photovoltaik	15
6.2 Brennstoffzelle	16
6.3 Windkraft	20
7 Diskussion	23
7.1 Photovoltaik	23
7.2 Brennstoffzelle	24
7.3 Windkraft	24
8 Zusammenfassung	25
8.1 Photovoltaik	25
8.2 Brennstoffzelle	26
8.3 Windkraft	29
Literatur	32

1 Aufgabenstellung

Der Versuch Erneuerbare Energien besteht aus mehreren verschiedenen Teilen, wo mit unterschiedlichen Methoden zur Energieerzeugung gearbeitet wird.

1.1 Photovoltaik

Im ersten Teilversuch gilt es mithilfe zweier Solarmodule und einer Lampe, welche als Sonne dient, verschiedene Schaltungstypen zu Testen und die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom zu ermitteln.

Im weiteren Teil wird das selbe für unterschiedliche Abstände zur Lichtquelle wiederholt.

1.2 Brennstoffzelle

Bei dem Teil der Brennstoffzelle wird an die Zelle Spannung angelegt und gemessen, ab welcher Spannung sich die Gastanks zu füllen beginnen.

Im zweiten Teil mit der Brennstoffzelle gilt es den Wirkungsgrad zu bestimmen. Dazu wird die Volumensänderung pro Zeit im Gastank gemessen.

Beim dritten Teil wird die Kennlinie der Brennstoffzelle ermittelt. Durch schrittweises Verringern des Widerstandes an einem Potentiometer lässt sich die Spannung und der Strom messen und daraus die Leistung berechnen.

1.3 Windkraft

Im ersten Teil wird eine Windmaschine vor ein Windrad gestellt und mit unterschiedlichen Eingangsspannungen wird die Leerlaufspannung am Windrad gemessen. Anschließend wird die Eingangsspannungen an der Windmaschine fixiert und das Windrad in gewissen Abständen davon entfernt und erneut die Leerlaufspannung gemessen.

Im zweiten Teil wird Beobachtet, was bei einzelnen Extrempfällen passiert. Dazu wird der Luftstrom abrupt gestoppt und die Leerlaufspannung am Windrad wird gemessen. Anschließend wird der Luftstrom abrupt gestartet und es wird erneut die Leerlaufspannung gemessen. Die beiden Extrempfälle werden anschließend mit einer Kapazität zwischen Windrad und Multimeter wiederholt. Die Energie wird in Form eines elektrischen Potentials gespeichert.

Im letzten Teil wird durch ein Windrad Energie erzeugt, welche genutzt wird um an der Brennstoffzelle Elektrolyse zu betreiben. Hierbei wird die Energie als chemisches Potential gespeichert.

Alle Informationen und Methodiken wurden uns von der Technischen Universität bereitgestellt [1].

2 Voraussetzungen & Grundlagen

2.1 Photovoltaik

Eine Solarzelle wandelt Sonnenenergie (Strahlungsenergie) in elektrische Energie um. Sie besteht aus einer Photodiode, welche aus n-dotierten und p-dotierten Halbleitern besteht. N-dotierte Halbleiter bestehen aus Atomen mit 5 Valenzelektronen. Diese werden auf ein

Gitter aus Atomen mit 4 Valenzelektronen angebracht. P-dotierte Halbleiter bestehen aus Atomen mit 3 Valenzelektronen, welche an das Gitter angeordnet werden. So entstehen "Löcher". Kombiniert man nun die beiden Halbleiter so können Elektronen aus n-dotierten Halbleitern in die freien Löcher der p-dotierten Halbleiter. Dadurch entsteht Ladung an der Grenzfläche der Halbleiter und erzeugen ein elektrisches Feld. Die Grenzfläche ist nun die Raumladungszone. . Einfallende Photonen erzeugen Elektronen und Löcher. Diese müssen an der Grenzfläche getrennt werden, somit fließt Strom.

2.2 Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle kann elektrische Energie aus Wasserstoff und Sauerstoff erzeugen. Dieser Prozess lässt sich auch umkehren. Fügt man der Zelle el. Energie zu, so kann aus Wasser Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt werden. Die Zelle besitzt eine protonenleitende Membran (PEM) und benötigt daher keine Säuren oder Laugen. Der Vorgang, in dem elektrische Energie aus Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt wird nennt man kalte Verbrennung. Der reverse Prozess, wo aus el. Energie Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt wird nennt man Elektrolyse.

Nutzt man die Brennstoffzelle für Elektrolyse, so wird an einer Anode Wasserstoff in Protonen und Elektronen geteilt. Die Protonen reagieren an der Kathode mit Sauerstoff und Elektronen und bilden Wasser. Die Elektronen fließen an einen äußeren Stromkreis und leisten dabei elektrische Arbeit.

Für die Erzeugung von Wasserstoff wird el. Energie in das System gespeist. Wasser wird dadurch in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten.

Die Leistung P , welche bei Elektrolyse entsteht, wird mit folgender Formel mit Unsicherheit berechnet.

$$P = U * I \quad \Delta P = \left| \frac{\partial}{\partial U} * \Delta U \right| + \left| \frac{\partial}{\partial I} * \Delta I \right| \quad (1)$$

Des Weiteren wird die Energie E benötigt. Sie lässt sich mit der Formel

$$E = P * t \quad \Delta E = \left| \frac{\partial}{\partial P} * \Delta P \right| + \left| \frac{\partial}{\partial t} * \Delta t \right| \quad (2)$$

und dazugehöriger Unsicherheit berechnen.

Um den Wirkungsgrad η zu berechnen benötigt man die Leistung P , die Energie E sowie die Masse m . Um den Wirkungsgrad η in Prozent anzuschreiben multipliziert man das Ergebnis nochmals mit 100.

$$\eta = \frac{P}{E_{zu}} = \frac{P}{E * \frac{m}{molmasse}} \quad \Delta \eta = \left| \frac{\partial}{\partial P} * \Delta P \right| + \left| \frac{\partial}{\partial E_{zu}} * \Delta E_{zu} \right| \quad (3)$$

2.3 Windkraft

Bei einem Windrad wird aus Bewegungsenergie el. Energie erzeugt. Ein Windrad ist in Rotor und Generator geteilt. Dabei unterscheidet man zwischen horizontalen und vertikalen Ausrichtungen. Bei vertikal ausgerichteten Windrädern ist die Windrichtung nicht

relevant. Bei horizontalen Windrädern, wie man sie Heutzutage sieht, ist die Windrichtung entscheidend. Der große Vorteil von horizontalen gegenüber Vertikalen ist der Wirkungsgrad, welcher mehr als 50% beträgt.

Man unterscheidet bei Wind zwei Arten von Strömung. Laminare, welche gleichmäßig verläuft, und nicht laminare (turbulente) Strömung. Ein weiterer Punkt von Strömungen ist die Einteilung in stationäre und nicht stationäre Strömung. Bei stationärer Strömung ist die Geschwindigkeit überall im Strom konstant.

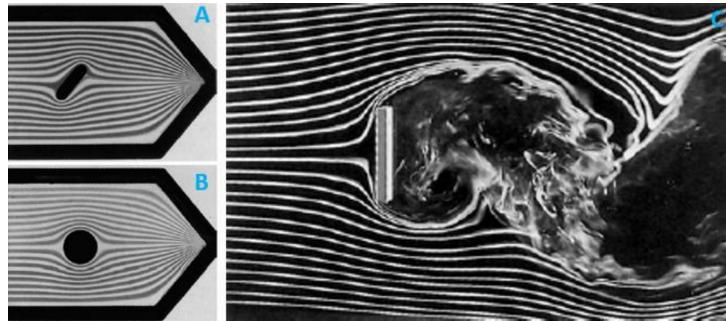


Abb. 1: Laminare Strömung (A, B) um verschiedene Objekte. Nicht laminare Strömung (C). Entnommen aus Skriptum Erneuerbare Energien [1]

Um zu beschreiben, wie sich die Drücke p in der laminaren Strömung verhalten, verwendet man die Bernoulli-Gleichung. Dabei entspricht ρ der Dichte und u der Geschwindigkeit.

$$p + \frac{1}{2}\rho u^2 = p_0 = \text{konst.} \quad (4)$$

Für den aerodynamischen Auftrieb werden Flügel unsymmetrischer Form verwendet, welche zu unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten über und unter dem Flügel führen. Von der Bernoulli-Gleichung beschrieben führt die unterschiedliche Geschwindigkeit auch zu unterschiedlichen Drücken.

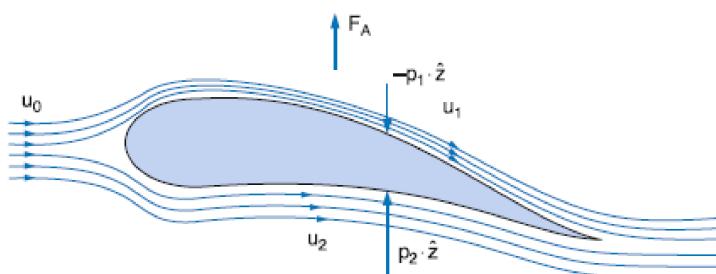


Abb. 2: Aerodynamischer Auftrieb am Beispiel einer Tragfläche. Entnommen aus Skriptum Erneuerbare Energien [1]

Daraus lässt sich die Auftriebskraft F berechnen.

$$F = (p_2 - p_1) * A \approx \frac{1}{2}\rho_L(u_1^2 - u_2^2) * A \quad (5)$$

Diese Tragflächen als Flügel am Windrad führen zu Drehmoment, und erzeugen dadurch am Generator Strom.

Für die Auswertung wird die erzeugte Menge an Wasserstoff/Sauerstoff pro Minute benötigt. Mit der folgenden Formel lässt sich diese, sowie dessen Unsicherheit berechnen.

$$\text{Menge}/\text{min} = \frac{\text{Gesamtmenge}}{\text{Gesamtzeit}} \quad \Delta M/\text{min} = \left| \frac{\partial}{\partial M} * \Delta M \right| + \left| \frac{\partial}{\partial t} * \Delta t \right| \quad (6)$$

3 Versuchsanordnung

Der Versuch Erneuerbare Energien ist in mehrere Teilbereiche aufgeteilt. Im Ersten wird mit einer Solarzelle gearbeitet. Im Zweiten mit einer Brennstoffzelle. Der dritte Teil besteht aus Windmaschine und Windrad. Im letzten Abschnitt wird das Windrad und die Brennstoffzelle kombiniert. Genauere Beschreibungen des Aufbaus werden im Abschnitt Versuchsdurchführung beschrieben.

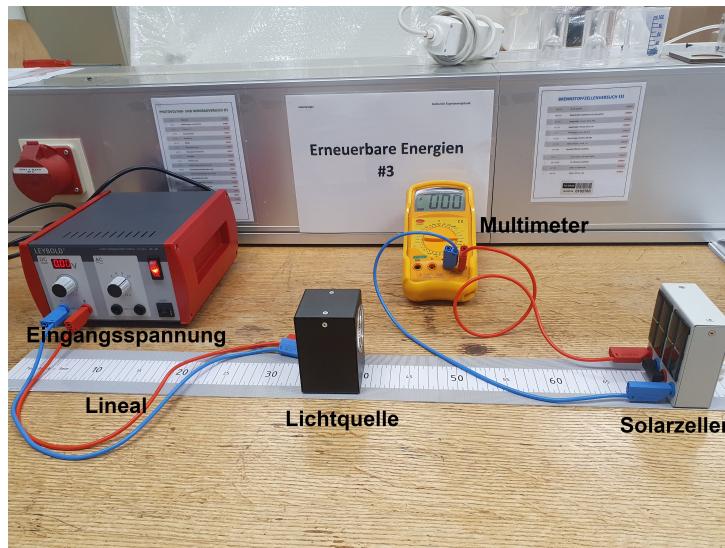


Abb. 3: Aufbau des Teilversuches Photovoltaik

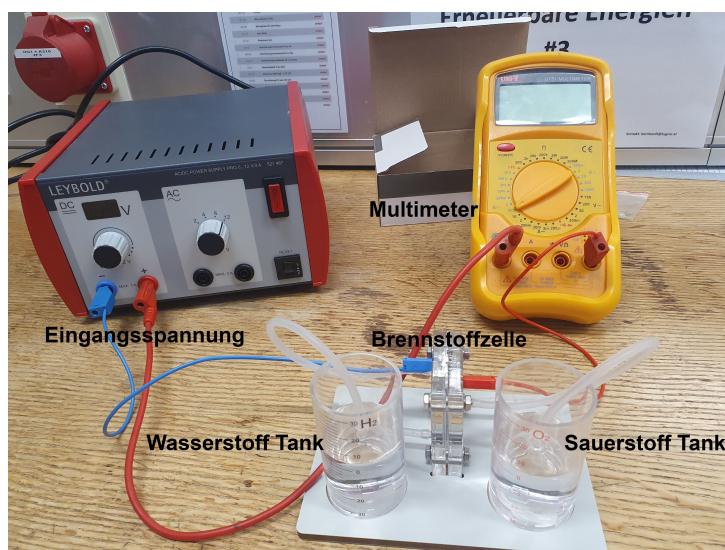


Abb. 4: Aufbau des Teilversuches Brennstoffzelle

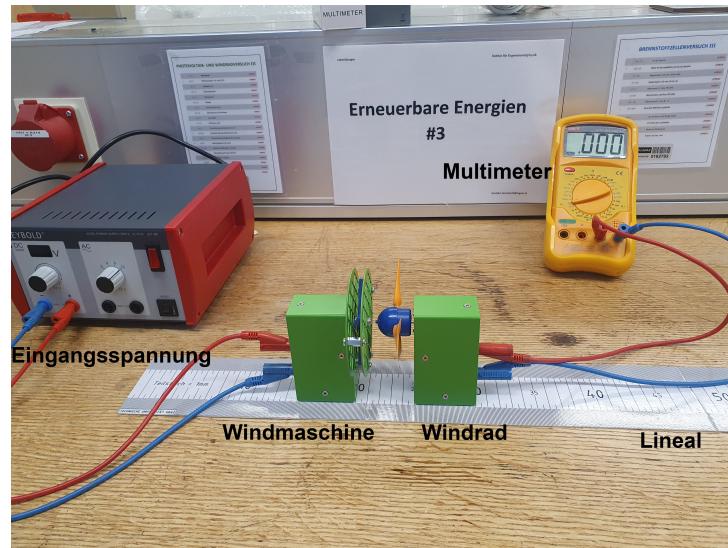


Abb. 5: Aufbau des Teilversuches Windkraft

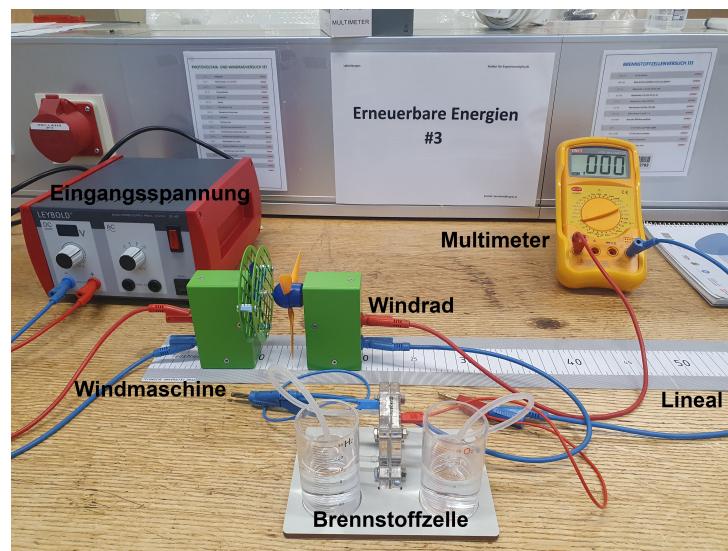
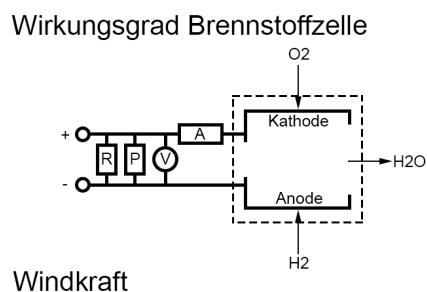
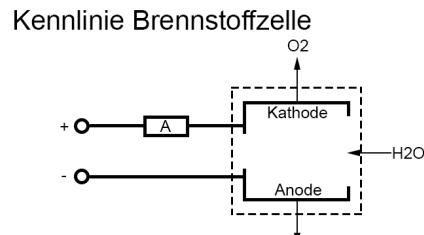
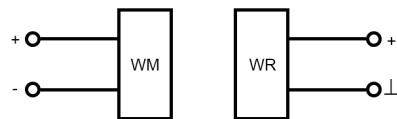


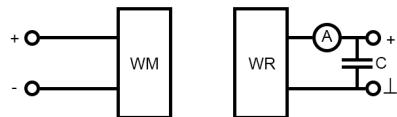
Abb. 6: Aufbau des Teilversuches Speicherung der Energie



Windkraft



Speicherung der Energie als elektrisches Potential



Speicherung der Energie als chemisches Potential

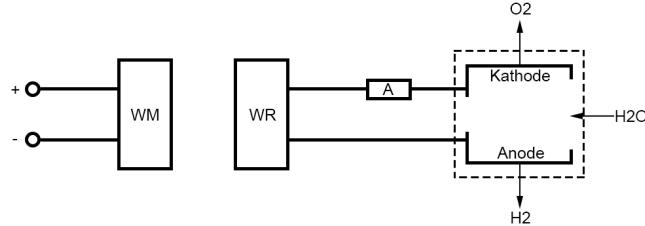


Abb. 7: Zu vorbereitende Schaltpläne

4 Geräteliste

Tab. 1: Im Versuch verwendete Geräte und Utensilien.

Gerät	Gerätenummer	Unsicherheit
Leybold AC/DC PSU PRO 0...12 V/3 A	521 487	n.a
Multimeter (Spannung) UNI-T	UT51	$\pm(0.5\% + 1dig.)V$ [2]
Multimeter (Strom) UNI-T	UT51	$\pm(0.8\% + 1dig.)A$ [2]
Multimeter Voltcraft	VC170-1	$\pm(0.5\% + 8dig.)V$ [3]
Lineal	n.a	$\pm 1mm$
Stoppuhr Samsung S10+	SM-G975F	$\pm 0.01s$
Kondensator	n.a	n.a
Leuchte	n.a	n.a
Solarzelle	n.a	n.a
Brennstoffzelle	n.a	n.a
Windmaschine	n.a	n.a
Windrad	n.a	n.a
Schaltboard	n.a	n.a

5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse

5.1 Photovoltaik

Im ersten Teilversuch wird die Schaltung laut Abbildung 3 aufgebaut. Der Abstand zwischen Lampe und Solarmodul beträgt $(30.0 \pm 0.1)cm$. Die Eingangsspannung beträgt 12V. Jeweils für die linke Solarzelle, die rechte Solarzelle, eine Parallelschaltung und eine Serienschaltung wird die Leerlaufspannung U und der Kurzschlussstrom I gemessen.

Aus den Messungen erhält man:

- $U_{Links} = (1.103 \pm 0.007)V$
- $U_{Rechts} = (1.098 \pm 0.007)V$
- $U_{Seriell} = (2.20 \pm 0.03)V$
- $U_{Parallel} = (1.10 \pm 0.02)V$
- $I_{Links} = (33.4 \pm 0.4)mA$
- $I_{Rechts} = (35.7 \pm 0.4)mA$
- $I_{Seriell} = (33.6 \pm 0.4)mA$
- $I_{Parallel} = (69.1 \pm 0.7)mA$

Der Versuch ist für unterschiedliche Abstände d der Lampe zum Solarmodul zu wiederholen. Die Änderung des Abstandes erfolgt in 5cm Schritten.

Tab. 2: Leerlaufspannung U des Solarmoduls bei verschiedenen Abständen d

Nr.	$d \pm 0.1$ / cm	U_L / V	U_R / V	$U_{Seriell}$ / V	$U_{Parallel}$ / V
1	5.0	1.149 \pm 0.007	1.152 \pm 0.007	2.30 \pm 0.03	1.16 \pm 0.02
2	10.0	1.142 \pm 0.007	1.148 \pm 0.007	2.30 \pm 0.03	1.15 \pm 0.02
3	15.0	1.109 \pm 0.007	1.120 \pm 0.007	2.24 \pm 0.03	1.12 \pm 0.02
4	20.0	1.082 \pm 0.007	1.089 \pm 0.007	2.18 \pm 0.03	1.09 \pm 0.02
5	25.0	1.060 \pm 0.007	1.062 \pm 0.007	2.13 \pm 0.03	1.07 \pm 0.02
6	30.0	1.042 \pm 0.007	1.040 \pm 0.007	2.09 \pm 0.03	1.05 \pm 0.02
7	35.0	1.028 \pm 0.007	1.021 \pm 0.007	2.06 \pm 0.03	1.03 \pm 0.02
8	40.0	1.014 \pm 0.007	1.005 \pm 0.007	2.02 \pm 0.03	1.01 \pm 0.02
9	45.0	1.004 \pm 0.007	0.991 \pm 0.006	2.00 \pm 0.03	1.00 \pm 0.02
10	50.0	0.995 \pm 0.006	0.978 \pm 0.006	1.97 \pm 0.02	0.99 \pm 0.02
11	55.0	0.987 \pm 0.006	0.965 \pm 0.006	1.95 \pm 0.02	0.97 \pm 0.02
12	60.0	0.980 \pm 0.006	0.952 \pm 0.006	1.93 \pm 0.02	0.96 \pm 0.02
13	65.0	0.974 \pm 0.006	0.943 \pm 0.006	1.91 \pm 0.02	0.95 \pm 0.02
14	70.0	0.968 \pm 0.006	0.931 \pm 0.006	1.89 \pm 0.02	0.94 \pm 0.02
15	75.0	0.963 \pm 0.006	0.921 \pm 0.006	1.87 \pm 0.02	0.93 \pm 0.02
16	80.0	0.953 \pm 0.006	0.913 \pm 0.006	1.86 \pm 0.02	0.92 \pm 0.02
17	85.0	0.944 \pm 0.006	0.907 \pm 0.006	1.84 \pm 0.02	0.92 \pm 0.02
18	90.0	0.938 \pm 0.006	0.899 \pm 0.006	1.82 \pm 0.02	0.91 \pm 0.02

Tab. 3: Kurzschlussstrom I des Solarmoduls bei verschiedenen Abständen d

Nr.	$d \pm 0.1$ / cm	I_L / mA	I_R / mA	$I_{Seriell}$ / mA	$I_{Parallel}$ / A
1	5.0	142.2 \pm 1.3	79.6 \pm 0.8	61.0 \pm 0.6	0.265 \pm 0.004
2	10.0	167.8 \pm 1.5	155.1 \pm 1.4	127.0 \pm 1.1	0.261 \pm 0.003
3	15.0	116.4 \pm 1.1	111.8 \pm 1.1	79.0 \pm 0.8	0.202 \pm 0.003
4	20.0	73.3 \pm 0.7	71.8 \pm 0.7	58.0 \pm 0.5	0.136 \pm 0.002
5	25.0	50.5 \pm 0.5	50.2 \pm 0.5	44.1 \pm 0.4	0.096 \pm 0.002
6	30.0	36.7 \pm 0.4	37.1 \pm 0.4	31.3 \pm 0.4	0.071 \pm 0.002
7	35.0	27.8 \pm 0.4	28.3 \pm 0.4	23.7 \pm 0.4	0.054 \pm 0.002
8	40.0	21.7 \pm 0.3	22.1 \pm 0.3	21.8 \pm 0.3	0.043 \pm 0.002
9	45.0	17.7 \pm 0.3	17.7 \pm 0.3	18.2 \pm 0.3	0.034 \pm 0.002
10	50.0	14.8 \pm 0.3	15.0 \pm 0.3	15.8 \pm 0.3	0.028 \pm 0.002
11	55.0	12.7 \pm 0.2	13.6 \pm 0.2	13.4 \pm 0.2	0.024 \pm 0.002
12	60.0	11.2 \pm 0.2	11.7 \pm 0.2	11.3 \pm 0.2	0.021 \pm 0.002
13	65.0	10.1 \pm 0.2	10.1 \pm 0.2	10.0 \pm 0.2	0.018 \pm 0.002
14	70.0	9.1 \pm 0.2	9.0 \pm 0.2	8.9 \pm 0.2	0.016 \pm 0.002
15	75.0	8.0 \pm 0.2	8.1 \pm 0.2	7.9 \pm 0.2	0.015 \pm 0.002
16	80.0	7.1 \pm 0.2	7.4 \pm 0.2	7.1 \pm 0.2	0.013 \pm 0.002
17	85.0	6.5 \pm 0.2	6.7 \pm 0.2	6.5 \pm 0.2	0.013 \pm 0.002
18	90.0	6.0 \pm 0.2	6.1 \pm 0.2	6.0 \pm 0.2	0.012 \pm 0.001

5.2 Brennstoffzelle

Bei dem Versuch mit der Brennstoffzelle wird die Schaltung wie in Abbildung 4 gezeigt aufgebaut. Die Brennstoffzelle wird mit Wasser gefüllt. Die beiden Tanks werden bis zur

0-Linie mit Wasser gefüllt und die Gastanks werden eingesetzt und über Schläuche mit der Brennstoffzelle verbunden. Die Brennstoffzelle wird mit Spannung versorgt, es findet also eine kalte Verbrennung statt und Wasserstoff wird hergestellt. Die Eingangsspannung U_{ein} wird langsam erhöht und der Strom I_{gem} wird mit dem Multimeter gemessen. Dabei ist zu beobachten, ab welcher angelegten Spannung sich die Gastanks anfangen zu befüllen. Bei dem Versuch ist ein befüllen ab einer Eingangsspannung von $U_{ein} = (1.72 \pm 0.01)V$ beobachtbar gewesen. Ist das geschehen, so wird die Spannung erhöht, bis die Strömstärke 500 mA erreicht.

Die Unsicherheit der Spannung U_{ein} ist die Ableseunsicherheit des Gerätes.

Tab. 4: Strom I_{gem} in Abhängigkeit der Eingangsspannung U_{ein} der Brennstoffzelle bei kalter Verbrennung.

Nr.	$U_{ein} \pm 0.01 / V$	I_{gem} / mA
1	1.72	54 ± 2
2	1.80	84 ± 2
3	1.92	117 ± 2
4	2.00	144 ± 3
5	2.12	171 ± 3
6	2.24	214 ± 3
7	2.32	225 ± 3
8	2.44	259 ± 4
9	2.52	284 ± 4
10	2.64	315 ± 4
11	2.72	339 ± 4
12	2.80	369 ± 4
13	2.92	418 ± 5
14	3.00	444 ± 5
15	3.12	495 ± 5

Die Gastanks sind vom vorherigen Teil mit Wasserstoff und Sauerstoff gefüllt. Das Volumen beträgt dabei in beiden Tanks $(20 \pm 1)ml$ (Unsicherheit implizit angenommen). In die Schaltung wird ein Potentiometer (Stellung g), sowie ein Widerstand mit $(5.1 \pm 0.1)\Omega$ eingefügt (Unsicherheit implizit angenommen). Durch Messung der Volumensänderung im Wasserstofftank pro Zeit, sowie Strom und Spannung, lässt sich die Leistung berechnen, sowie die geleistete Arbeit.

Das Volumen im Wasserstofftank verringert sich auf $(12 \pm 1) ml$ in einer Zeit von $(289.4 \pm 0.1)s$ (Unsicherheit der Handstoppuhr implizit angenommen). Die Spannung U beträgt dabei $(0.74 \pm 0.09)V$ und der Strom I beträgt $(0.14 \pm 0.02)A$.

Um die Kennlinie der Brennstoffzelle zu bestimmen, bleibt der Aufbau wie im vorherigen Punkt. Ohne zusätzlichen Widerstand wird der Widerstand am Potentiometer schrittweise verringert. Dabei wird die Spannung U und der Strom I aufgezeichnet. Durch hinzufügen eines Widerstandes von $(5.1 \pm 0.1)\Omega$ parallel zum Potentiometer wird der Versuch erneut durchgeführt.

Tab. 5: Messdaten der Spannung U und des Stromes I zur bestimmung der Kennlinie

Nr.	Potentiometer	U_{ohneR} / V	I_{ohneR} / A	U_{mitR} / V	I_{mitR} / A
1	g	0 ± 0.008	0.949 ± 0.009	0.14 ± 0.009	0.720 ± 0.007
2	g-f	0 ± 0.008	0.947 ± 0.009	0.13 ± 0.009	0.635 ± 0.007
3	f	0.001 ± 0.009	0.944 ± 0.009	0.12 ± 0.009	0.590 ± 0.006
4	f-e	0.001 ± 0.009	0.938 ± 0.009	0.11 ± 0.009	0.540 ± 0.006
5	e	0.001 ± 0.009	0.934 ± 0.009	0.10 ± 0.009	0.481 ± 0.005
6	e-d	0.001 ± 0.009	0.928 ± 0.009	0.09 ± 0.009	0.414 ± 0.005
7	d	0.001 ± 0.009	0.923 ± 0.009	0.08 ± 0.009	0.400 ± 0.005
8	d-c	0.001 ± 0.009	0.916 ± 0.009	0.08 ± 0.009	0.381 ± 0.005
9	c	0.001 ± 0.009	0.905 ± 0.009	0.07 ± 0.009	0.352 ± 0.004
10	c-b	0.002 ± 0.009	0.892 ± 0.009	0.07 ± 0.009	0.304 ± 0.004
11	b	0.003 ± 0.009	0.875 ± 0.008	0.06 ± 0.009	0.276 ± 0.004
12	b-a	0.008 ± 0.009	0.818 ± 0.008	0.06 ± 0.009	0.215 ± 0.003
13	a	0.030 ± 0.009	0.250 ± 0.003	0.06 ± 0.009	0.040 ± 0.002

5.3 Windkraft

Der Versuch wird wie in Abbildung 5 aufgebaut. Der Abstand zwischen Windmaschine und Windrad beträgt $(5.0 \pm 0.1)cm$. Die Eingangsspannung U_{ein} wird langsam erhöht, und die Leerlaufspannung U_{leer} am Windrad wird gemessen.

Tab. 6: Leerlaufspannung des Windrades

Nr.	$U_{ein} \pm 0.01$ / V	U_{leer} / V
1	5.28	3.12 ± 0.03
2	5.79	3.50 ± 0.03
3	6.12	3.77 ± 0.03
4	6.76	4.22 ± 0.04
5	7.20	4.51 ± 0.04
6	7.68	4.82 ± 0.04
7	8.12	5.13 ± 0.04
8	8.76	5.57 ± 0.04
9	9.30	5.94 ± 0.04
10	9.69	6.19 ± 0.04

Im zweiten Teil wird die Eingangsspannung U_{ein} auf $(10 \pm 0.01)V$ fixiert und der Abstand d zwischen Windmaschine und Windrad wird schrittweise erhöht. Die Leerlaufspannung U_{leer} wird gemessen.

Tab. 7: Leerlaufspannung U_{leer} bei unterschiedlichen Abständen d zur Windmaschine

Nr.	$U_{ein} \pm 0.01 / V$	U_{leer} / V	$d \pm 0.1 / cm$
1	10.0	6.45 ± 0.05	5
2	10.0	6.07 ± 0.04	7
3	10.0	5.64 ± 0.04	9
4	10.0	4.76 ± 0.04	11
5	10.0	4.40 ± 0.04	13
6	10.0	4.25 ± 0.04	15
7	10.0	3.67 ± 0.03	17
8	10.0	2.91 ± 0.03	19
9	10.0	2.42 ± 0.03	21
10	10.0	2.05 ± 0.02	23

In diesen Teil werden mehrere Szenarien getestet. Dabei wird die Energie, welche das Windrad erzeugt in Form von einem elektrischen Potential gespeichert. Die Schaltung wird wie bei Teil 1 laut Abbildung 5 aufgebaut. Der Abstand d wird dabei auf $(15 \pm 0.1)cm$ festgelegt. Durch den gewählten Abstand beträgt die Maximale Spannung $(4.52 \pm 0.04)V$. Im ersten Szenario wird getestet, wie sich die Spannung U verhält, wenn der Luftstrom abrupt gestoppt wird. Dabei wird die Zeit t jede Sekunde nach dem Abschalten, sowie die Spannung U gemessen.

Tab. 8: Spannung U pro Sekunde nach abbrupten Abschalten

Nr.	$t \pm 0.1 / s$	U / V
1	0	4.52 ± 0.04
2	1	3.53 ± 0.03
3	2	2.37 ± 0.03
4	3	1.87 ± 0.02
5	4	1.50 ± 0.02
6	5	1.21 ± 0.02
7	6	0.98 ± 0.02
8	7	0.69 ± 0.02
9	8	0.54 ± 0.02
10	9	0.32 ± 0.02
11	10	0.19 ± 0.02
12	11	0.00 ± 0.01

Das zweite Szenario testet, was passiert, wenn der Luftstrom abbrupt startet.

Tab. 9: Spannung U pro Sekunde nach abrupten Start

Nr.	$t \pm 0.1 / \text{s}$	U / V
1	0	0.00 ± 0.01
2	1	0.03 ± 0.02
3	2	0.26 ± 0.02
4	3	0.56 ± 0.02
5	4	0.88 ± 0.02
6	5	1.26 ± 0.02
7	6	2.02 ± 0.02
8	7	2.83 ± 0.03
9	8	3.50 ± 0.03
10	9	4.10 ± 0.04
11	10	4.36 ± 0.04
12	11	4.52 ± 0.04

Im dritten Szenario werden die beiden vorherigen Szenarios erneut getestet, nur mit einem Kondensator zwischen Windrad und Multimeter. Hierbei wird die Spannung U alle 5 Sekunden gemessen.

Tab. 10: Spannung U nach abrupten Stop und Start mit Kondensator

Nr.	$t \pm 0.1 / \text{s}$	$U_{\text{Stop}} / \text{V}$	$U_{\text{Start}} / \text{V}$
1	0	3.05 ± 0.03	0.00 ± 0.01
2	5	1.79 ± 0.02	0.45 ± 0.02
3	10	1.48 ± 0.02	1.11 ± 0.02
4	15	1.33 ± 0.02	1.92 ± 0.02
5	20	1.21 ± 0.02	2.44 ± 0.03
6	25	1.12 ± 0.02	2.78 ± 0.03
7	30	1.03 ± 0.02	2.98 ± 0.03
8	35	0.95 ± 0.02	3.16 ± 0.03
9	40	0.87 ± 0.02	3.32 ± 0.03
10	45	0.80 ± 0.02	3.48 ± 0.03
11	50	0.72 ± 0.02	3.58 ± 0.03
12	55	0.65 ± 0.02	
13	60	0.58 ± 0.02	

Im letzten Teil wird die erzeugte Spannung des Windrades als Spannungsquelle für die Brennstoffzelle verwendet. Die Schaltung wird wie in Abbildung 6 aufgebaut. Die Eingangsspannung U_{ein} beträgt $(10.0 \pm 0.1)\text{V}$, der Abstand $d = (5 \pm 0.1)\text{cm}$ beträgt . Bei Start der Messung betrug der Stand im Wasserstofftank $(8 \pm 1)\text{ml}$ und im Sauerstofftank $(5 \pm 1)\text{ml}$. Beim Stoppen der Messung betrug der Stand im Wasserstofftank $(12 \pm 1)\text{ml}$ und im Sauerstofftank $(7 \pm 1)\text{ml}$. Dies dauerte insgesamt $(267.5 \pm 0.1)\text{s}$.

6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse

In der Auswertung werden zur erhöhten Genauigkeit durchgehend ungerundete Werte bis zu den Endergebnissen verwendet und nur zur Darstellung gerundet.

Zur Berechnung der Unsicherheiten wird, wenn nicht anders angegeben, die Größtunsicherheitsmethode verwendet.

6.1 Photovoltaik

Wie man aus der Aufzählung der Messergebnisse in Sektion Photovoltaik der Versuchsdurchführung erkennen kann, addieren sich die Spannungen U , wenn man die beiden Solarmodule in Serie schaltet. Bei der Strommessung lässt sich erkennen, dass bei Parallelschaltung der Strom I der einzelnen Module addiert wird.

Die Spannungen U und Ströme I der Abstandsmessungen werden in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

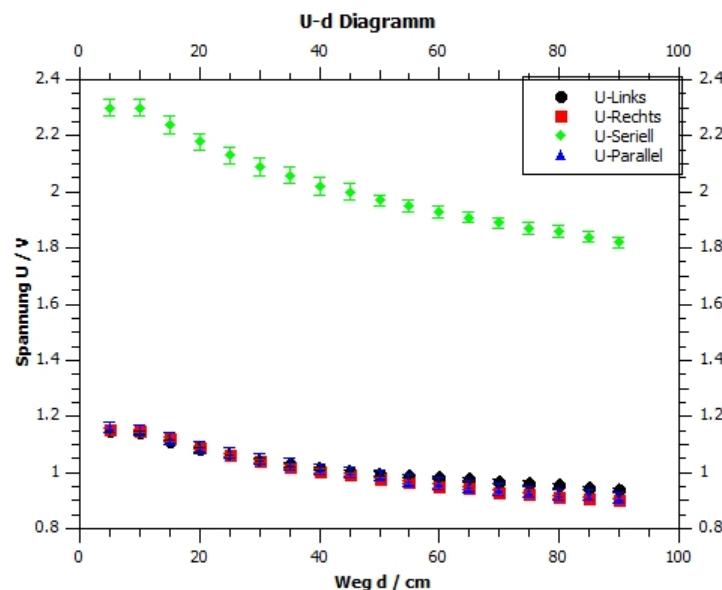


Abb. 8: Spannungen U der einzelnen Schaltungen des Solarmoduls bei verschiedenen Abständen d

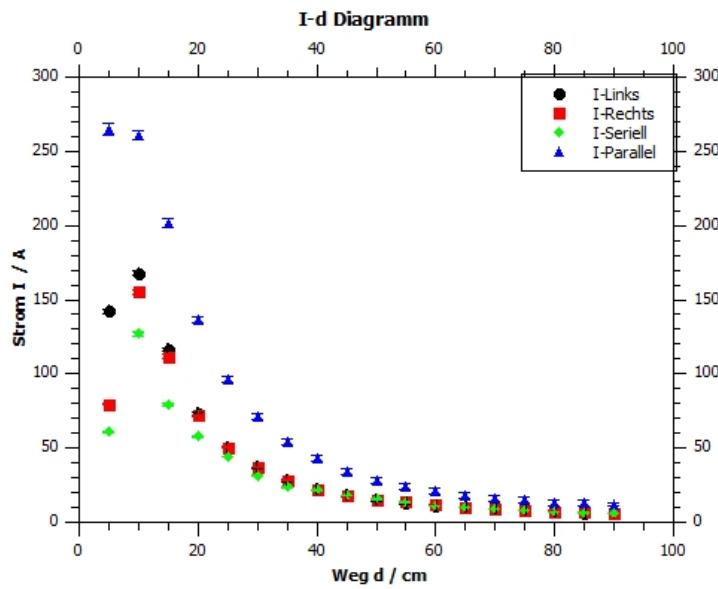


Abb. 9: Ströme I der einzelnen Schaltungen des Solarmoduls bei verschiedenen Abständen d

Bei den Diagramm der Spannung U lässt sich erkennen, dass die Spannung U linear abfällt mit dem Abstand d zur Lichtquelle. Bei der Seriellschaltung (grün) erkennt man, dass die einzelnen Spannungen U_{Links} (schwarz) und U_{Rechts} (rot) addiert werden, die Parallelschaltung (blau) hingegen wird nicht addiert. Im Gegenzug bei dem Diagramm der Stromstärke I erkennt man einen exponentiellen Abfall der Stromstärke I . Bei der Parallelschaltung (blau) erkennt man, dass die einzelnen Ströme I_{Links} (schwarz) und I_{Rechts} (rot) addiert werden.

6.2 Brennstoffzelle

Die Daten aus der Tabelle 4 werden als Diagramm dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass die Gastanks sich ab einer Spannung von $U = (1.72 \pm 0.01)V$ zu füllen beginnen. Die Brennstoffzelle wandelt in diesen Versuch elektrische Energie in chemische Energie um. Es findet daher eine kalte Verbrennung statt.

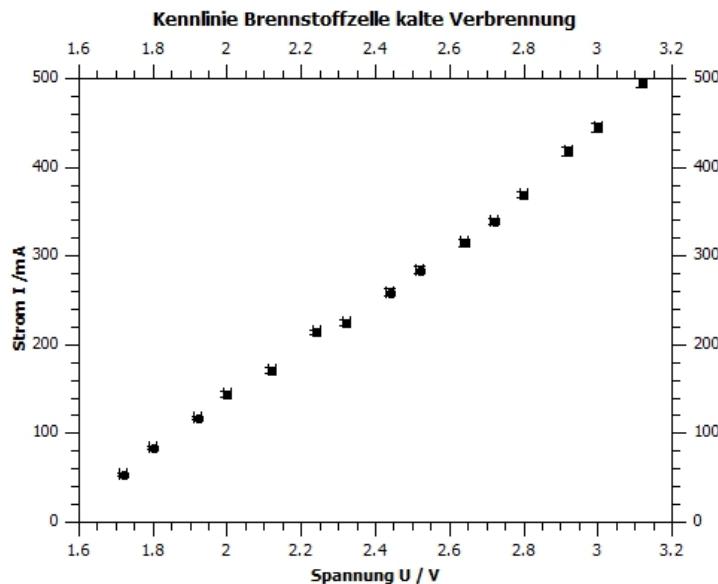


Abb. 10: Kennlinie der Brennstoffzelle bei kalter Verbrennung. Der Strom I in Abhängigkeit der Eingangsspannung U

Im zweiten Teil gilt es die Leistung der Brennstoffzelle zu berechnen. Dazu benötigt man die Spannung U und den Strom I . Eingesetzt in die Formel 1 kann man die Leistung P berechnen und kommt auf einen Wert von $P = (0.10 \pm 0.02)W$.

Die Energie E lässt sich aus der Leistung P und der Zeit t pro Volumeneinheit berechnen. Die Zeit t pro Volumeneinheit lässt sich mit dem Kehrwert Formel 6 berechnen und man erhält für die Zeit $t = (0.63 \pm 0.09)min$, was in Sekunden $t = (36.2 \pm 5.4)s$ entspricht. Mit diesen Werten und der Formel 2 kommt man für die Energie E auf den Wert von $E = (3.7 \pm 1.3)J$. Um den Wirkungsgrad zu berechnen benötigt man die Leistung P , sowie die zugeführte Energie E_{zu} . Diese lässt sich aus der Energie E sowie der Molzahl des verbrauchten Wasserstoffes berechnen. Eine Volumeneinheit beträgt dabei 1ml, was 0.09g entspricht. Eingesetzt in die Formel 3 mit einer Molaren Masse des Wasserstoff von 2.016 g/mol, erhält man einen Wirkungsgrad von $\eta = (60.6 \pm 40.1)\%$.

Im dritten Teil wird für die Werte aus der Tabelle 5 die Spannung U in Abhängigkeit des Stromes I dargestellt.

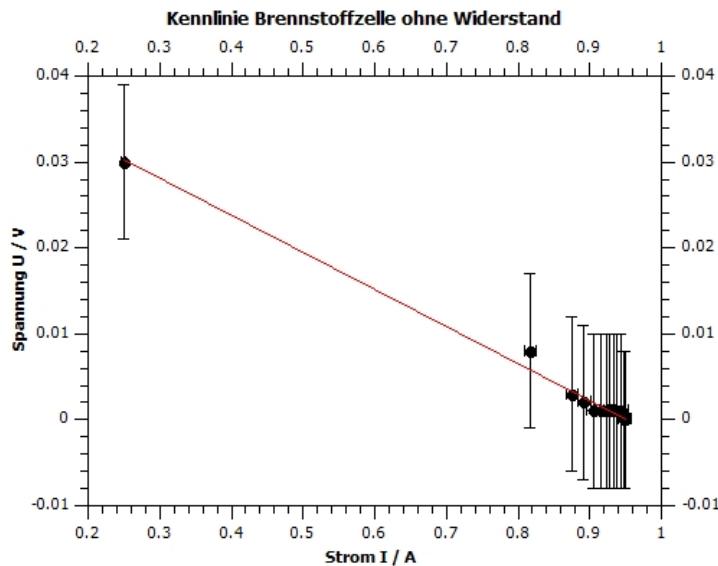


Abb. 11: Kennlinie der Brennstoffzelle bei Elektrolyse ohne Widerstand R . Die Spannung U in Abhängigkeit des Stromes I . Mit der Steigung (rote Linie) von (-0.043 ± 0.014)

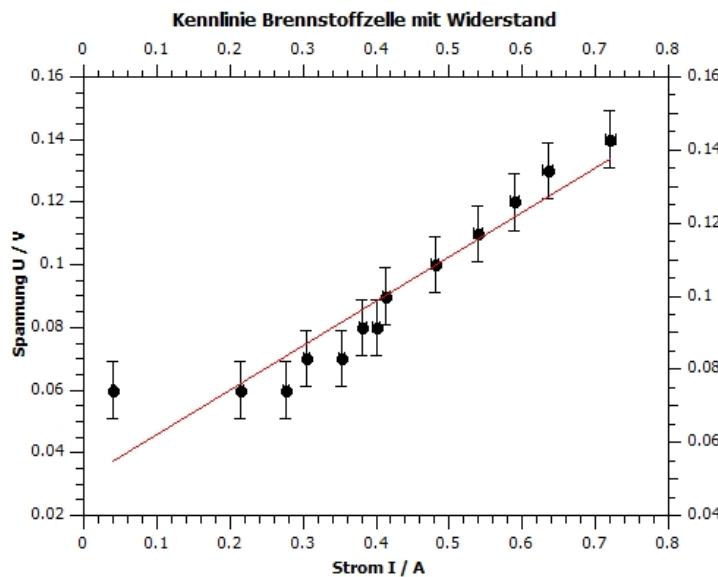


Abb. 12: Kennlinie der Brennstoffzelle bei Elektrolyse mit Widerstand R . Die Spannung U in Abhängigkeit des Stromes I . Mit der Steigung (rote Linie) von (0.142 ± 0.014)

Des Weiteren wird die Leistung P , welche mit der Formel 1 berechnet wird in einem Diagramm in Abhängigkeit des Stromes I dargestellt und quadratisch genähert.

Tab. 11: Leistung P der Brennstoffzelle in Abhängigkeit des Stromes I

Nr.	P_{ohneR} / W	I_{ohneR} / A	P_{mitR} / W	I_{mitR} / A
1	0 ± 0.008	0.949 ± 0.009	0.109 ± 0.008	0.720 ± 0.007
2	0 ± 0.008	0.947 ± 0.009	0.087 ± 0.007	0.635 ± 0.007
3	0.001 ± 0.009	0.944 ± 0.009	0.079 ± 0.007	0.590 ± 0.006
4	0.001 ± 0.009	0.938 ± 0.009	0.060 ± 0.006	0.540 ± 0.006
5	0.001 ± 0.009	0.934 ± 0.009	0.049 ± 0.005	0.481 ± 0.005
6	0.001 ± 0.009	0.928 ± 0.009	0.038 ± 0.005	0.414 ± 0.005
7	0.001 ± 0.009	0.923 ± 0.009	0.033 ± 0.004	0.400 ± 0.005
8	0.001 ± 0.009	0.916 ± 0.009	0.031 ± 0.004	0.381 ± 0.005
9	0.001 ± 0.009	0.905 ± 0.009	0.025 ± 0.004	0.352 ± 0.004
10	0.002 ± 0.009	0.892 ± 0.009	0.022 ± 0.004	0.304 ± 0.004
11	0.003 ± 0.008	0.875 ± 0.008	0.017 ± 0.003	0.276 ± 0.004
12	0.007 ± 0.008	0.818 ± 0.008	0.013 ± 0.003	0.215 ± 0.003
13	0.008 ± 0.003	0.250 ± 0.003	0.003 ± 0.001	0.040 ± 0.002

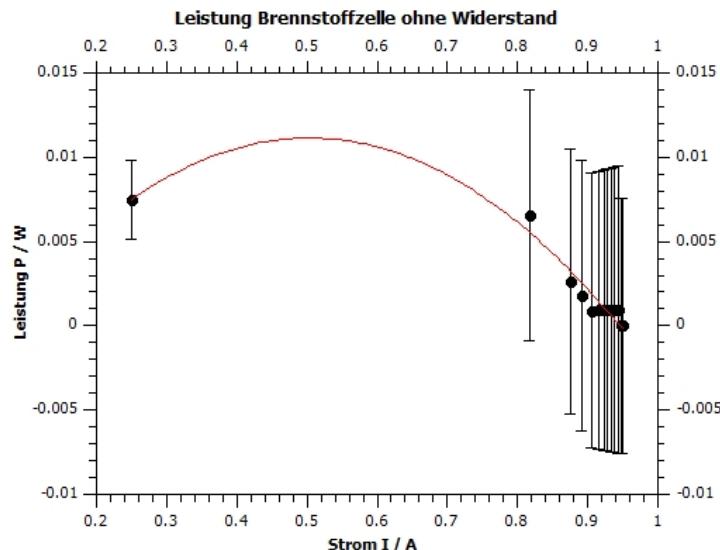


Abb. 13: Leistung P der Brennstoffzelle bei Elektrolyse ohne Widerstand R . Die Leistung P wird in Abhängigkeit des Stromes I dargestellt und quadratisch genähert (rote Kurve).

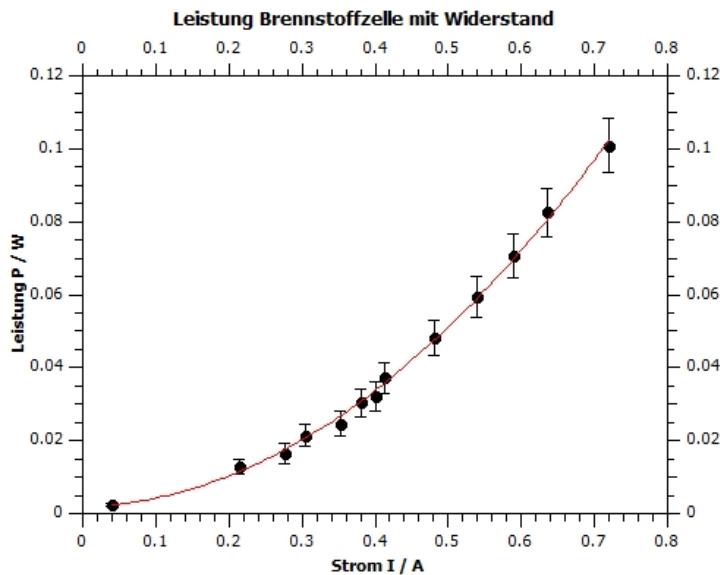


Abb. 14: Leistung P der Brennstoffzelle bei Elektrolyse mit Widerstand R . Die Leistung P wird in Abhängigkeit des Stromes I dargestellt und quadratisch genähert (rote Kurve).

6.3 Windkraft

Bei dem Versuch Windkraft wird im ersten Teil die Eingangsspannung U_{ein} erhöht. Die Leerlaufspannung U_{leer} steigt linear dazu an. Sieht man sich das folgende Diagramm an, welches die Leerlaufspannung U_{leer} in relation zur Eingangsspannung U_{ein} aus den Daten der Tabelle 6 zeigt, erkennt man einen linearen Anstieg.

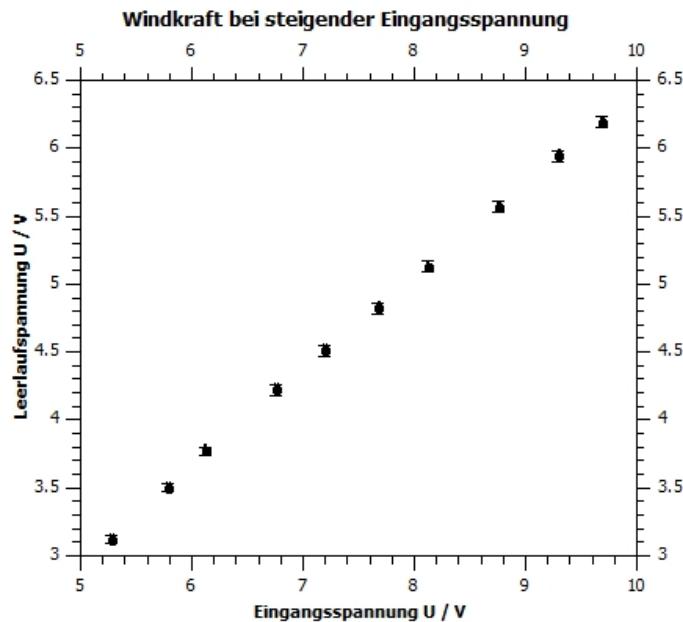


Abb. 15: Spannungen U der Windkraft bei fixem Abstand d von 5cm

Hingegen bei fixer Eingangsspannung U_{ein} von $(10.0 \pm 0.1)V$ und steigenden Abstand d sinkt die Leerlaufspannung U_{leer} linear. Aus den Messdaten der Tabelle 7 wird das Diagramm bebildet, was einen linearen Abfall der Leerlaufspannung U_{leer} mit zunehmenden

Abstand d zeigt.

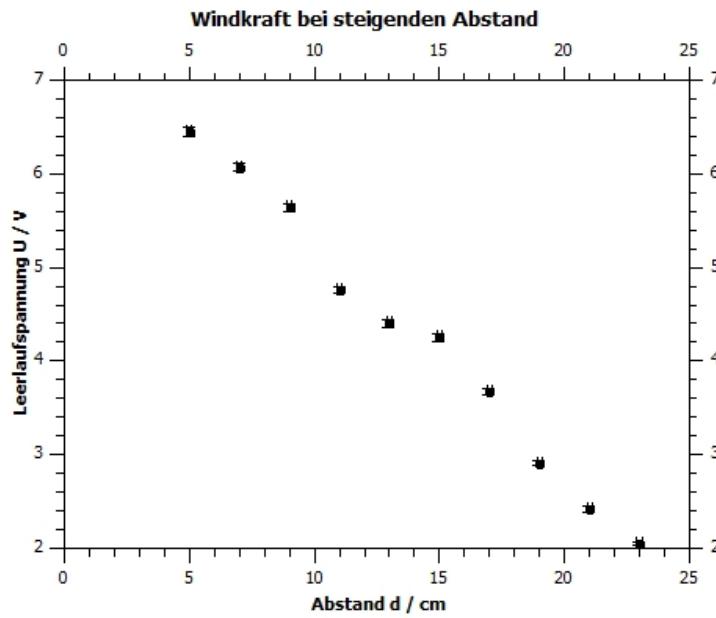


Abb. 16: Leerlaufspannung U_{leer} der Windkraft bei fixer Eingangsspannung U_{ein} und steigenden Abstand d

Bricht man den Luftstrom abrupt ab, so fällt die Leerlaufspannung U_{leer} anfangs schneller ab, als nach einer gewissen Zeit t , da das Windrad noch ein gewisses Drehmoment besitzt. Mit den Messdaten der Tabelle 8 wird ein Diagramm geplottet, in welchem man den Verlauf der Leerlaufspannung U_{leer} pro Zeit t sieht.

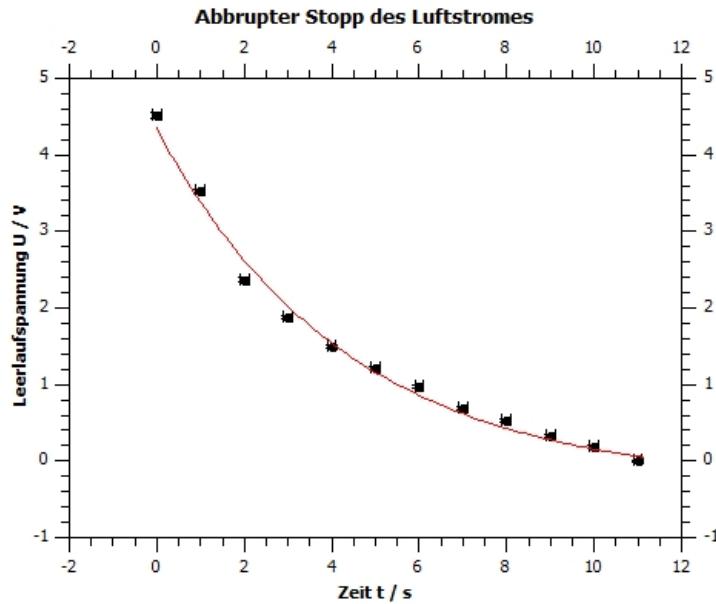


Abb. 17: Leerlaufspannung U_{leer} der Windkraft bei abruptem Stopp des Luftstromes pro Sekunde.

Hingegen startet man den Luftstrom abrupt, so lässt sich ein erst langsamer Anstieg der

Leerlaufspannung U_{leer} erkennen, welcher sich über Zeit der maximalen Leerlaufspannung U_{leer} nähert und diese dann erreicht.

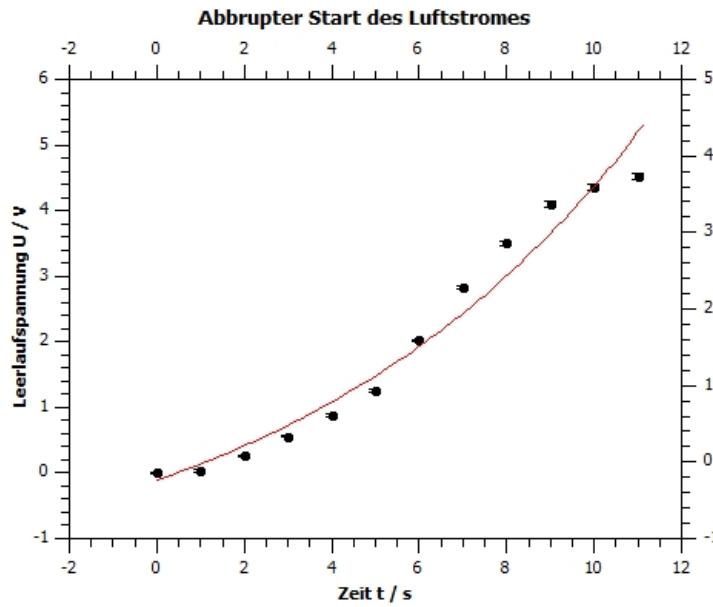


Abb. 18: Leerlaufspannung U_{leer} der Windkraft bei abrupten Start des Luftstromes pro Sekunde.

Bei hinzugefügten Kondensator lässt sich ein ähnlicher Anstieg/Abfall der Leerlaufspannung U_{leer} erkennen.

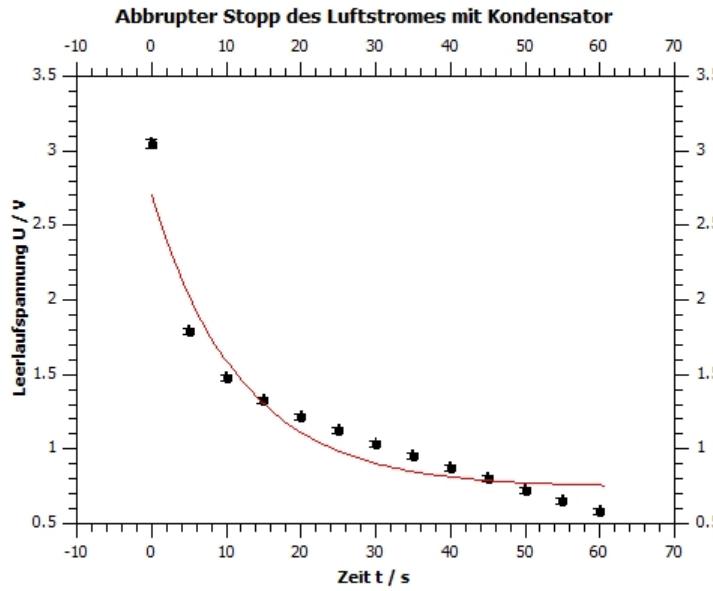


Abb. 19: Leerlaufspannung U_{leer} der Windkraft bei abrupten Stopp des Luftstromes pro Sekunde mit zugeschaltetem Kondensator.

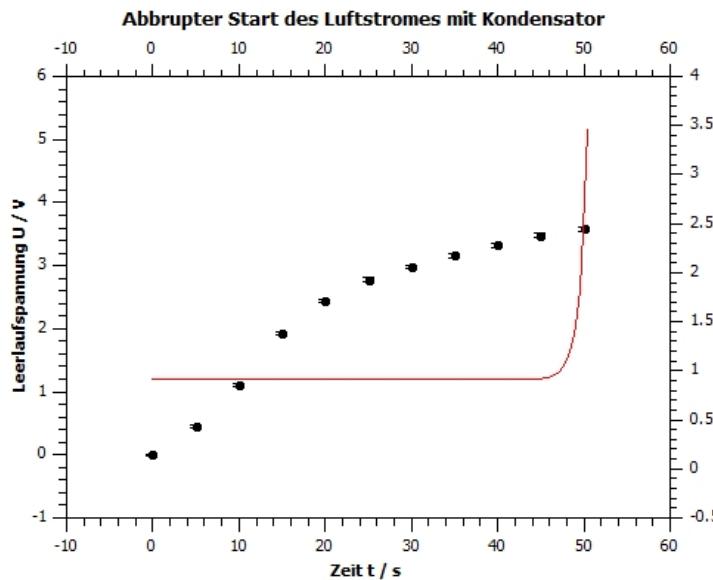


Abb. 20: Leerlaufspannung U_{leer} der Windkraft bei abrupten Start des Luftstromes pro Sekunde mit zugeschaltetem Kondensator.

Aus den obigen Graphen wird die Zeitkonstante t über einen exponentiellen Fit (rote Kurve) ermittelt. Dabei ergeben sich folgende Werte:

- Start ohne Kondensator: $t = (8.4 \pm 2.3)s$
- Stopp ohne Kondensator: $t = (4.41 \pm 0.4)s$
- Start mit Kondensator: $t = (1.0 \pm 26.9)s$
- Stopp mit Kondensator: $t = (0.2 \pm 2.4)s$

Der letzte Teil verwendet die erzeugte Spannung des Windrades als Spannungsquelle für die Brennstoffzelle. Die Zelle speichert die Energie als chemisches Potential, indem Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt wird. Laut den Messdaten erzeugt die Zelle in $(256.5 \pm 0.1)s$ $(4 \pm 1)ml$ Wasserstoff und $(2 \pm 1)ml$ Sauerstoff. Eingesetzt in die Formel 6 sieht man, dass die Brennstoffzelle pro Minute eine Wasserstoffmenge von $(1.0 \pm 0.3)ml$ und eine Sauerstoffmenge von $(0.5 \pm 0.3)ml$ erzeugt.

7 Diskussion

Anmerkung, in einigen Diagrammen sind die Unsicherheitsbalken teilweise nicht erkennbar, weil die Unsicherheiten teilweise sehr klein sind.

7.1 Photovoltaik

Die Photovoltaik revolutionierte die Energieherstellung. Alles was dafür benötigt war, ist eine Solarzelle und gutes Wetter. Die Energie der Sonne kann zur Stromerzeugung genutzt werden. Möglich mach dies der photoelektrische Effekt, welcher von dem bekannten Physiker Albert Einstein gedeutet wurde [6]. Dieser erhielt dafür auch den Nobelpreis im Jahre 1921 [4].

In dem Experiment Photovoltaik wird gemessen, wie sich die Spannung und der Strom in verschiedenen Schaltungen verhalten. Dabei ist zu beobachten, dass sich bei einer Serienschaltung die Spannung verdoppelt und bei einer Parallelschaltung der Strom.

Bei der Strommessung (Diagramm 9) ist zu erkennen, dass bei geringsten Abstand nicht der höchste Strom gemessen wurde. Dies kann verschiedene Gründe zufolge haben. Zu einem kann die Zelle überhitzen, da die Lichtquelle auch Wärmeenergie abstrahlt, es könnte aber auch die Lichtintensität zu hoch für dieses Solarmodul sein. Es gibt einen Punkt, wo zuviel Licht negative Auswirkungen auf die Solarzelle hat. Laut dem Diagramm 9 ist dieser Punkt bei einem Abstand kleiner als 5cm. Der optimale Abstand liegt laut dem Diagramm zwischen 10 und 15 cm.

Es lässt sich jedoch auf eine fehlerfreie Durchführung schließen.

7.2 Brennstoffzelle

Brennstoffzellen gewinnen immer mehr an Popularität. Besonders Autos, welche über Brennstoffzellen betrieben werden haben einen hohen Wert in der aktuellen Forschung.

In diesem Experiment wird eine Brennstoffzelle als Elektrolyse betrieben um Strom zu erzeugen, sowohl auch als kalter Verbrenner um Wasserstoff und Sauerstoff herzustellen. Bei der Elektrolyse ist zu beobachten, je höher die Eingangsspannung ist, umso schneller wird Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt und umso höher der Strom. Dabei wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt.

Im zweiten Teil wird aus der vorhandenen chemischen Energie elektrische Energie erzeugt. Dadurch lässt sich der Wirkungsgrad bestimmen. Eine Brennstoffzelle besitzt einen Wirkungsgrad von 35-62% [5], was auch in diesem Experiment das Ergebnis ist.
Es lässt sich daher auf eine fehlerfreie Durchführung schließen.

7.3 Windkraft

Windkraft nutzt die Energie des Windes um elektrische Energie zu erzeugen. Dabei werden die Flügel des Windrades Tragflächenförmig angeordnet. Durch diese Form entstehen unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten, wie in Abbildung 2 der Grundlagen ersichtlich ist.

Bei diesem Versuch wird gezeigt, dass je stärker der Wind, desto stärker der Energieoutput des Windrades. Laut der Tabelle 6 sieht man mit steigender Eingangsspannung, also ein stärkerer Wind, einen linear ansteigenden Energieoutput. Auch wie in Tabelle 7 gezeigt wird, nimmt die Leistung mit zunehmenden Abstand zur Windmaschine annähernd linear ab.

Bei abrupten Stoppen des Luftstromes kommt es durch die Drehimpulserhaltung nicht sofort zu einem stopp der Energieerzeugung, sondern erst nach gewisser Zeit. Dies lässt sich auch bei zugeschaltenem Kondensator beobachten. Auch bei abrupten Starten des Luftstromes läuft das Windrad nicht sofort auf maximalem Energieoutput, erst nach gewisser Zeit.

Es lässt sich auf eine Fehlerfreie Durchführung schließen.

8 Zusammenfassung

8.1 Photovoltaik

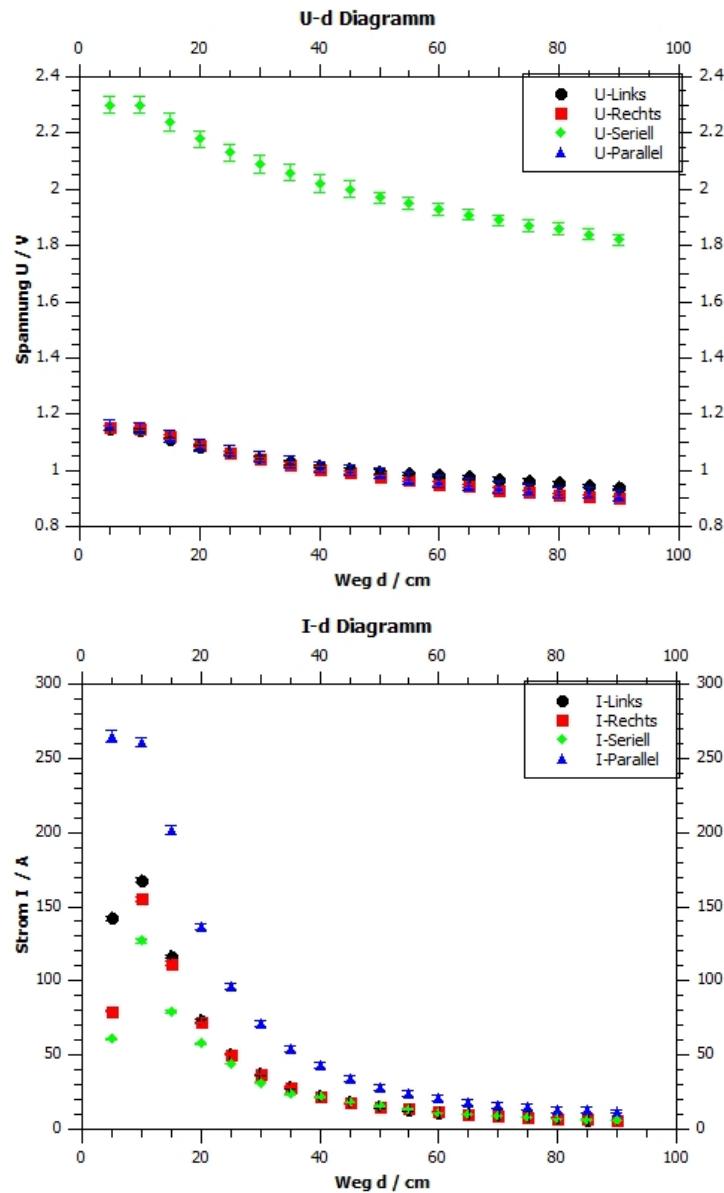


Abb. 21: Diagramme der Spannung U und Stromstärke I in Abhängigkeit des Abstands d .

8.2 Brennstoffzelle

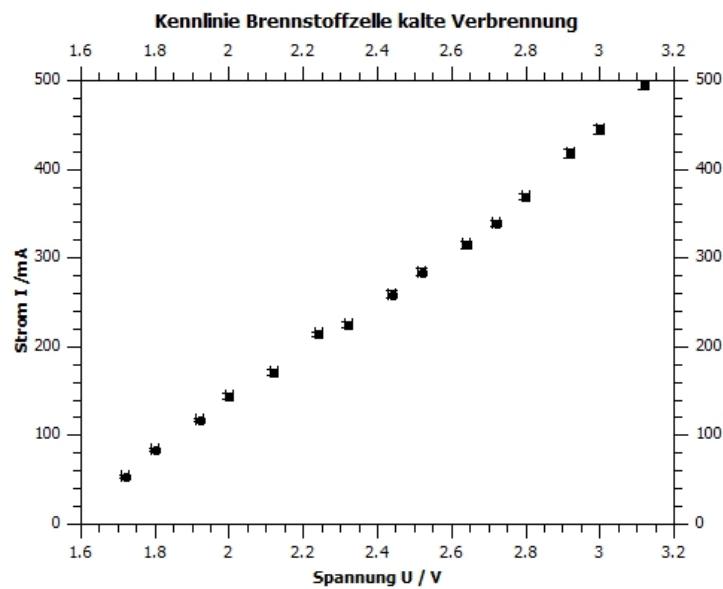


Abb. 22: Diagramm der Brennstoffzelle. Kennlinie bei kalter Verbrennung.

- $P = (0.10 \pm 0.02)W$
- $E = (3.7 \pm 1.3)J$
- $\eta = (60.6 \pm 40.1)\%$

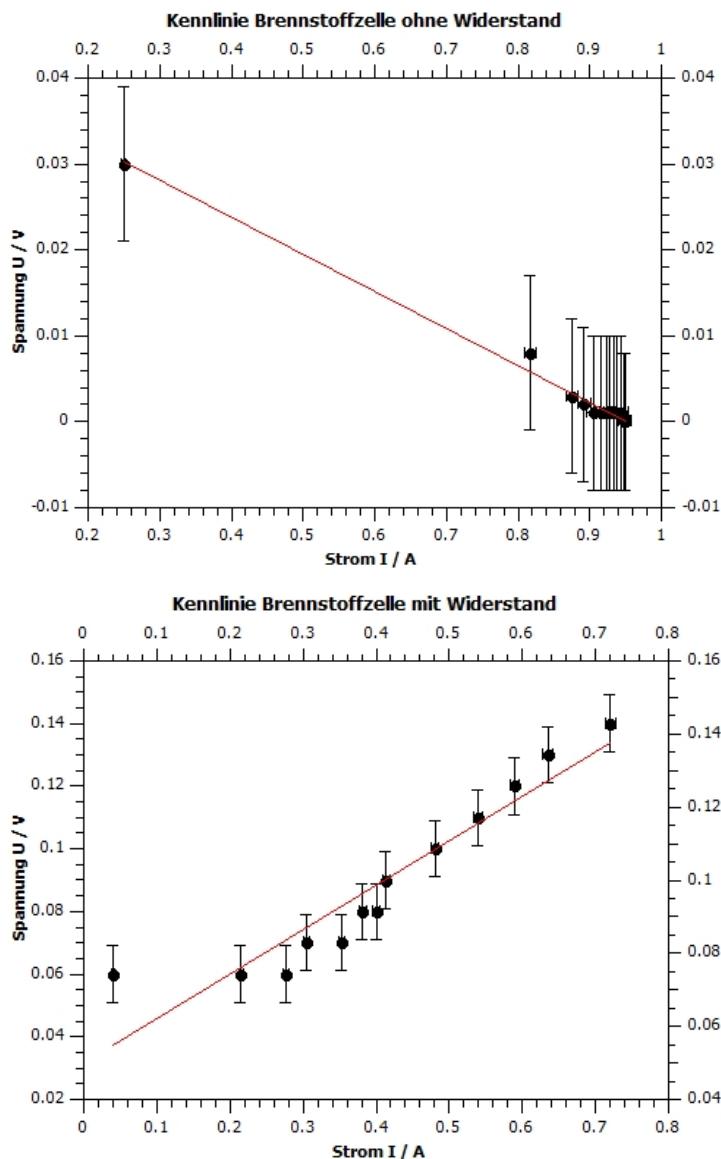


Abb. 23: Kennlinie der Brennstoffzelle bei Elektrolyse mit und ohne Widerstand.

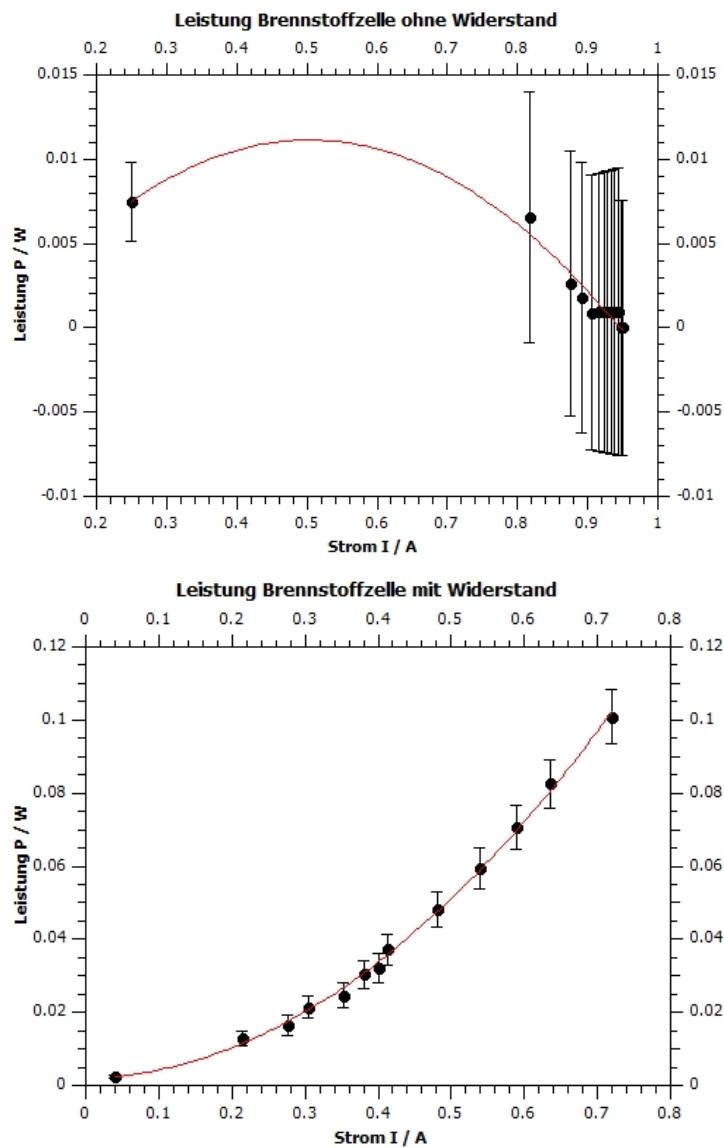


Abb. 24: Leistung der Brennstoffzelle bei Elektrolyse mit und ohne Widerstand.

8.3 Windkraft

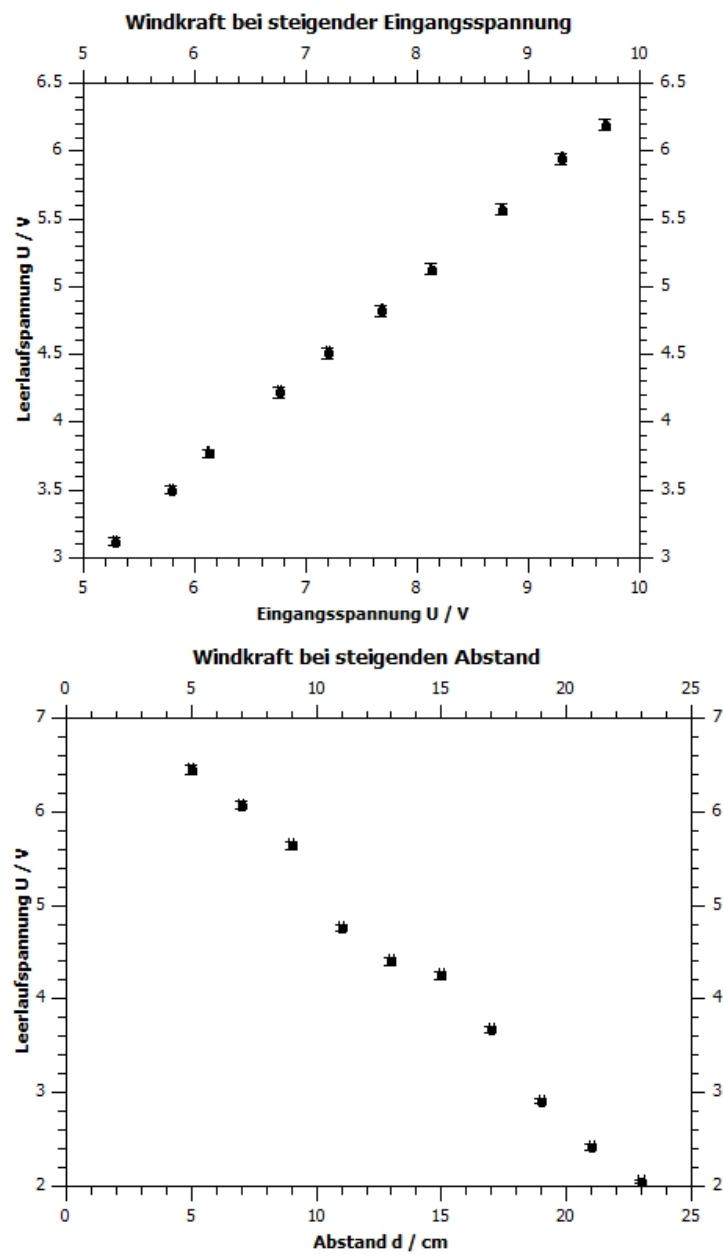


Abb. 25: Windkraft bei steigender Eingangsspannung U_{ein} und bei steigendem Abstand d .

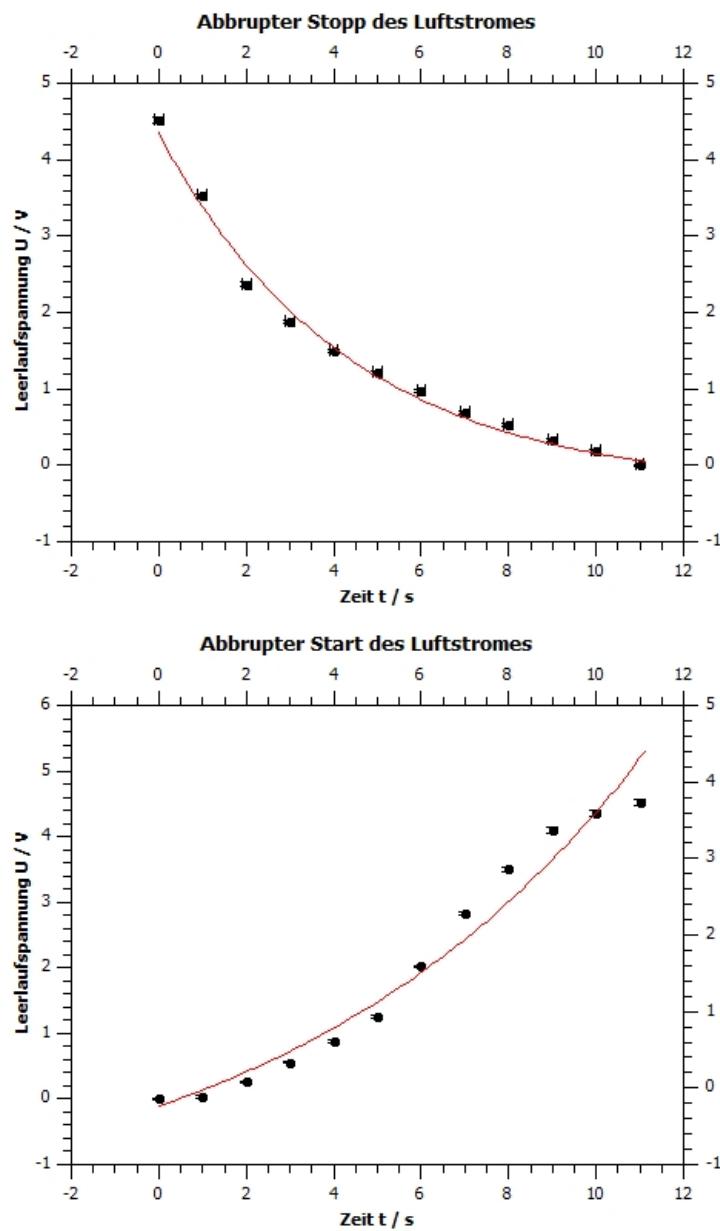


Abb. 26: Leerlaufspannung U_{leer} bei abrupten Stopp/Start ohne Kondensator

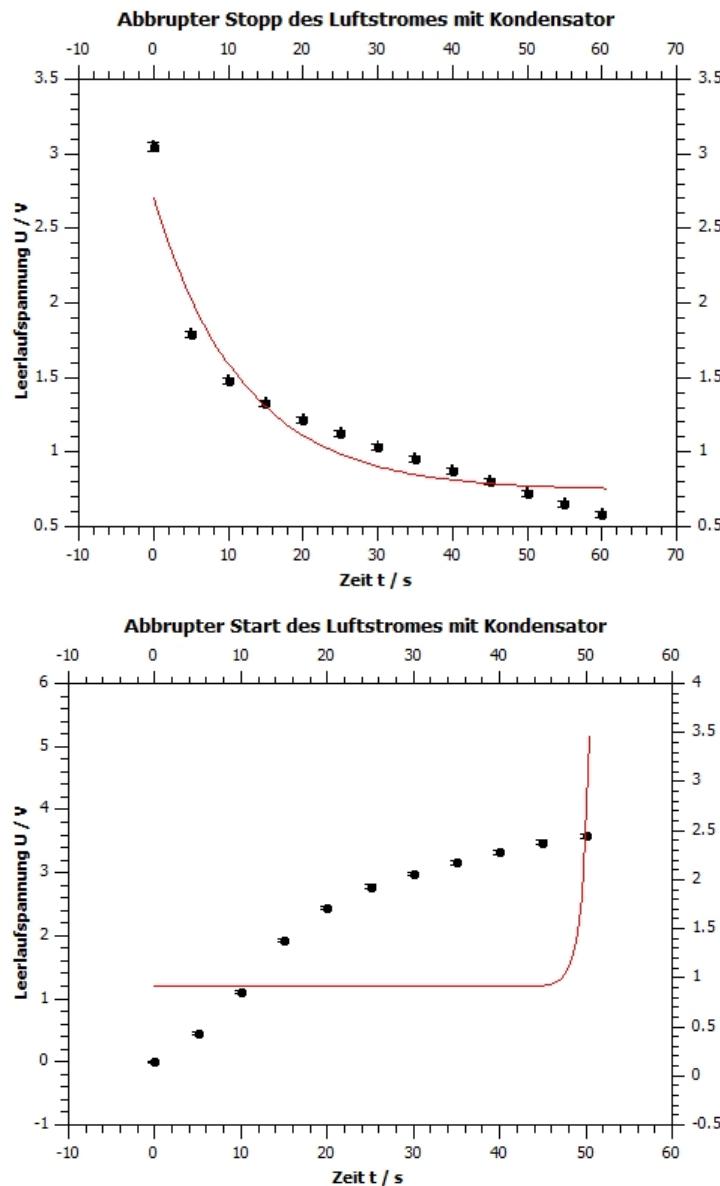


Abb. 27: Leerlaufspannung U_{leer} bei abrupten Stopp/Start mit Kondensator

Zeitkonstanten bei

- Start ohne Kondensator: $t = (8.4 \pm 2.3)s$
- Stopp ohne Kondensator: $t = (4.41 \pm 0.4)s$
- Start mit Kondensator: $t = (1.0 \pm 26.9)s$
- Stopp mit Kondensator: $t = (0.2 \pm 2.4)s$
- Erzeugte Wasserstoffmenge pro Minute: $(1.0 \pm 0.3)ml$
- Erzeugte Sauerstoffmenge pro Minute: $(0.5 \pm 0.3)ml$

Literatur

- [1] TU Graz TeachCenter. "*Laborübungen 2: Elektrizität, Magnetismus, Optik*". Kurs: *PHYD30UF*. (besucht am 10.11.2023). URL: <https://tc.tugraz.at/main/course/view.php?id=796>.
- [2] Multimeter UNI-T. *Herner Elektronik Shop*. (besucht am 10.11.2023). URL: <https://www.herner-elektronik-shop.de/ut51-digital-multimeter-uni-t.html>.
- [3] Multimeter Voltcraft. *Manualslib*. (besucht am 10.11.2023). URL: <https://www.manualslib.de/manual/317833/Voltcraft-Vc130-1.html?page=24#manual>.
- [4] Wikipedia. *Albert Einstein*. (besucht am 10.11.2023). URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein#Verleihung_des_Nobelpreises_\(1922\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein#Verleihung_des_Nobelpreises_(1922)).
- [5] Wikipedia. *Brennstoffzelle*. (besucht am 10.11.2023). URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Brennstoffzelle#Elektrischer_Wirkungsgrad,_Kosten,_Lebensdauer.
- [6] Wikipedia. *Photoelektrischer Effekt*. (besucht am 10.11.2023). URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Photoelektrischer_Effekt.