

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	5
4 Geräteliste	8
5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse	8
5.1 Photovoltaik	8
5.2 Brennstoffzelle	9
5.3 Windkraft	11
6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse	13
7 Diskussion	13
8 Zusammenfassung	13

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 [teachcenter2].

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.

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.

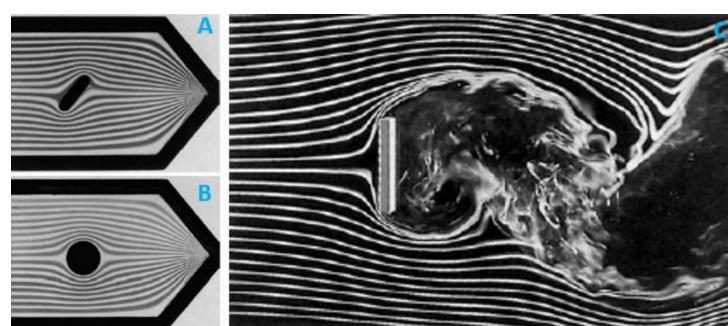


Abb. 1: Laminare Strömung (A, B) um verschiedene Objekte. Nicht laminare Strömung (C). Entnommen aus Skriptum Erneuerbare Energien [teachcenter2]

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.

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

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.

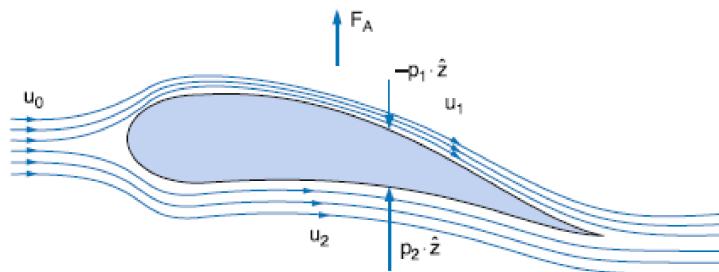


Abb. 2: Aerodynamischer Auftrieb am Beispiel einer Tragfläche. Entnommen aus Skriptum Erneuerbare Energien [teachcenter2]

Daraus lässt sich die Auftriebskraft F berechnen.

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

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

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.

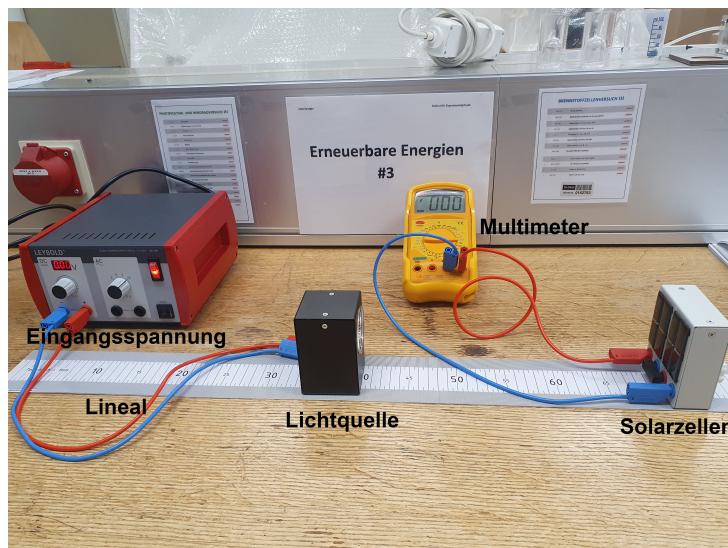


Abb. 3: Aufbau des Teilversuches Photovoltaik

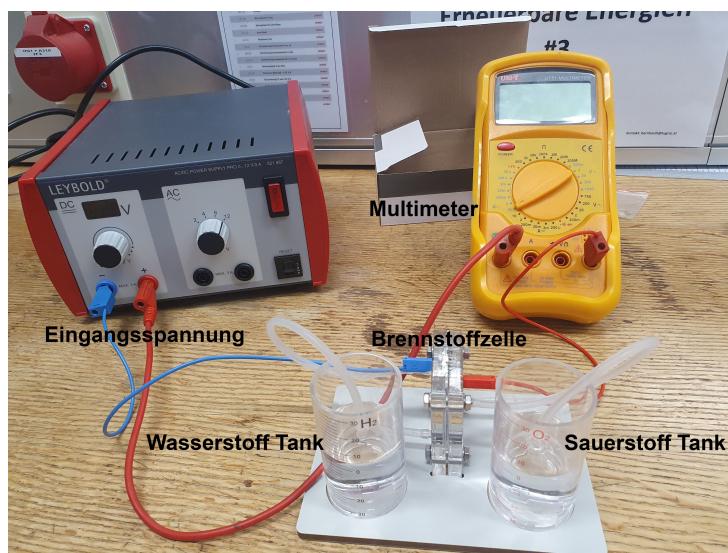


Abb. 4: Aufbau des Teilversuches Brennstoffzelle

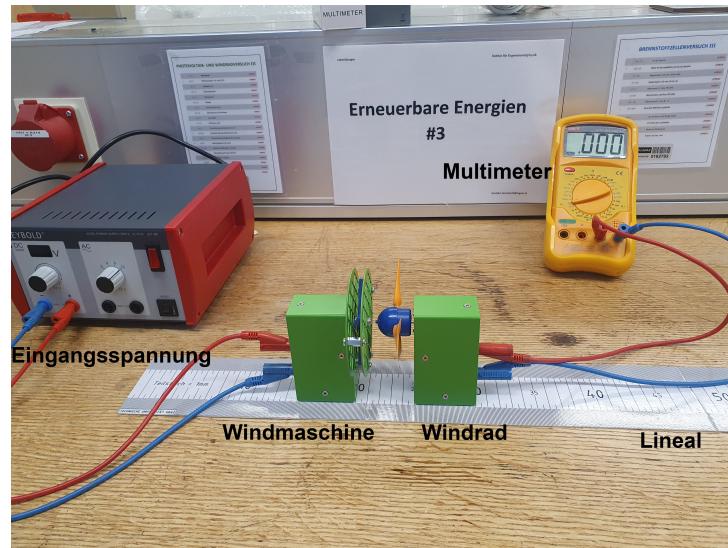


Abb. 5: Aufbau des Teilversuches Windkraft

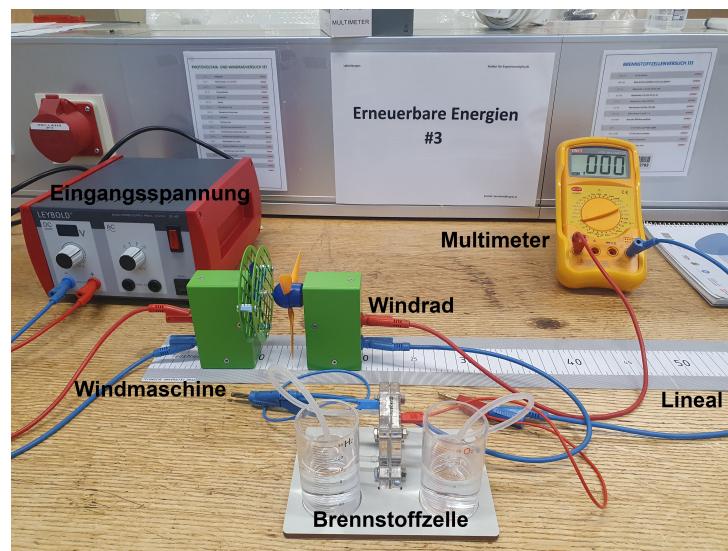


Abb. 6: Aufbau des Teilversuches Speicherung der Energie

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	$\pm(0.5\% + 1dig.)V$ [multimeter1]
Multimeter (Strom) UNI-T	UT51	$\pm(0.8\% + 1dig.)A$ [multimeter1]
Multimeter Voltcraft	VC170-1	$\pm(0.5\% + 8dig.)V$ [multimeter2]
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 ± 0.007	1.152 ± 0.007	2.30 ± 0.03	1.16 ± 0.02
2	10.0	1.142 ± 0.007	1.148 ± 0.007	2.30 ± 0.03	1.15 ± 0.02
3	15.0	1.109 ± 0.007	1.120 ± 0.007	2.24 ± 0.03	1.12 ± 0.02
4	20.0	1.082 ± 0.007	1.089 ± 0.007	2.18 ± 0.03	1.09 ± 0.02
5	25.0	1.060 ± 0.007	1.062 ± 0.007	2.13 ± 0.03	1.07 ± 0.02
6	30.0	1.042 ± 0.007	1.040 ± 0.007	2.09 ± 0.03	1.05 ± 0.02
7	35.0	1.028 ± 0.007	1.021 ± 0.007	2.06 ± 0.03	1.03 ± 0.02
8	40.0	1.014 ± 0.007	1.005 ± 0.007	2.02 ± 0.03	1.01 ± 0.02
9	45.0	1.004 ± 0.007	0.991 ± 0.006	2.00 ± 0.03	1.00 ± 0.02
10	50.0	0.995 ± 0.006	0.978 ± 0.006	1.97 ± 0.02	0.99 ± 0.02
11	55.0	0.987 ± 0.006	0.965 ± 0.006	1.95 ± 0.02	0.97 ± 0.02
12	60.0	0.980 ± 0.006	0.952 ± 0.006	1.93 ± 0.02	0.96 ± 0.02
13	65.0	0.974 ± 0.006	0.943 ± 0.006	1.91 ± 0.02	0.95 ± 0.02
14	70.0	0.968 ± 0.006	0.931 ± 0.006	1.89 ± 0.02	0.94 ± 0.02
15	75.0	0.963 ± 0.006	0.921 ± 0.006	1.87 ± 0.02	0.93 ± 0.02
16	80.0	0.953 ± 0.006	0.913 ± 0.006	1.86 ± 0.02	0.92 ± 0.02
17	85.0	0.944 ± 0.006	0.907 ± 0.006	1.84 ± 0.02	0.92 ± 0.02
18	90.0	0.938 ± 0.006	0.899 ± 0.006	1.82 ± 0.02	0.91 ± 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 ± 1.3	79.6 ± 0.8	61.0 ± 0.6	0.265 ± 0.004
2	10.0	167.8 ± 1.5	155.1 ± 1.4	127.0 ± 1.1	0.261 ± 0.003
3	15.0	116.4 ± 1.1	111.8 ± 1.1	79.0 ± 0.8	0.202 ± 0.003
4	20.0	73.3 ± 0.7	71.8 ± 0.7	58.0 ± 0.5	0.136 ± 0.002
5	25.0	50.5 ± 0.5	50.2 ± 0.5	44.1 ± 0.4	0.096 ± 0.002
6	30.0	36.7 ± 0.4	37.1 ± 0.4	31.3 ± 0.4	0.071 ± 0.002
7	35.0	27.8 ± 0.4	28.3 ± 0.4	23.7 ± 0.4	0.054 ± 0.002
8	40.0	21.7 ± 0.3	22.1 ± 0.3	21.8 ± 0.3	0.043 ± 0.002
9	45.0	17.7 ± 0.3	17.7 ± 0.3	18.2 ± 0.3	0.034 ± 0.002
10	50.0	14.8 ± 0.3	15.0 ± 0.3	15.8 ± 0.3	0.028 ± 0.002
11	55.0	12.7 ± 0.2	13.6 ± 0.2	13.4 ± 0.2	0.024 ± 0.002
12	60.0	11.2 ± 0.2	11.7 ± 0.2	11.3 ± 0.2	0.021 ± 0.002
13	65.0	10.1 ± 0.2	10.1 ± 0.2	10.0 ± 0.2	0.018 ± 0.002
14	70.0	9.1 ± 0.2	9.0 ± 0.2	8.9 ± 0.2	0.016 ± 0.002
15	75.0	8.0 ± 0.2	8.1 ± 0.2	7.9 ± 0.2	0.015 ± 0.002
16	80.0	7.1 ± 0.2	7.4 ± 0.2	7.1 ± 0.2	0.013 ± 0.002
17	85.0	6.5 ± 0.2	6.7 ± 0.2	6.5 ± 0.2	0.013 ± 0.002
18	90.0	6.0 ± 0.2	6.1 ± 0.2	6.0 ± 0.2	0.012 ± 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 abrupten 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 abrupt 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 von $1\mu\text{F}$ 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_{Stop} / V	U_{Start} / 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 $(10.0 \pm 0.1)\text{V}$. Bei Start der Messung betrug der Stand 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.

7 Diskussion

8 Zusammenfassung