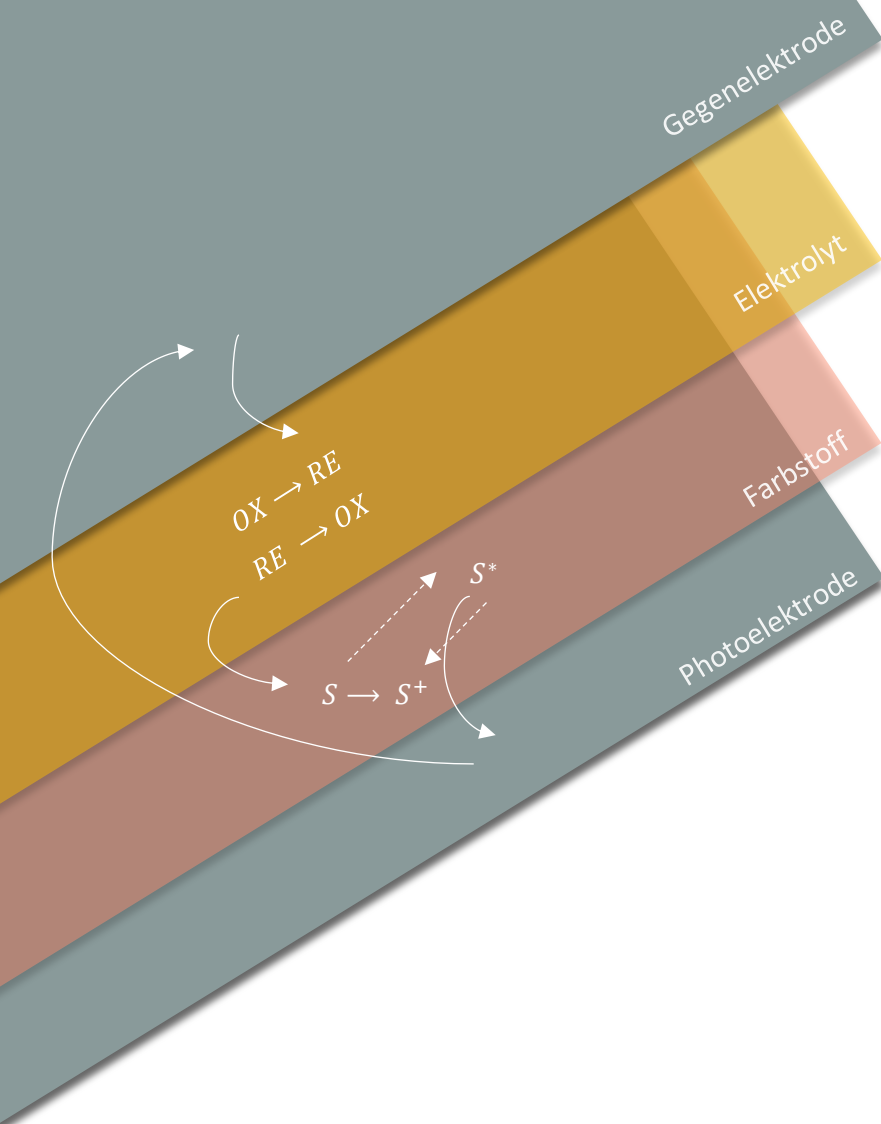


Alternative Grätzel-Zellen

Einfluss unterschiedlicher Redoxpaare auf die elektrischen Eigenschaften einer Grätzel-Zelle



Tamara Leuthold 6f
Kantonsschule Wiedikon
Zürich, 16.12.2020

Betreuung: Natalie Streiff
Korreferenz: Patrick Spengler

Abstract

In der vorliegenden Arbeit geht es darum, den Einfluss verschiedener Redoxpaare auf die elektrischen Eigenschaften von Grätzel-Zellen zu untersuchen. Dafür wurden unterschiedliche Elektrolyten hergestellt und in selbstgebaute Grätzel-Zellen eingebaut, dessen Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung gemessen wurde. Schliesslich wurden die Zellen nach ihren elektrischen Eigenschaften verglichen. Es konnte aufgezeigt werden, dass das Redoxpaar I_2/I_3^- , welches bereits als gängiges Redoxpaar in Grätzel-Zellen verwendet wird, die grösste ideale Leistung erreichen konnte. Eine Alternative, welche relativ stabile Werte aufzeigen konnte, war das Redoxpaar Fe^{2+}/Fe^{3+} . Die Versuche zeigten ausserdem, dass sich im Elektrolyten enthaltene Chlorid-Ionen negativ auf die Leistungen der Zelle auswirken.

Vorwort

Das sich fortlaufend verändernde Klima ist ein aktuelles Thema und beschäftigt uns alle. Dabei sind erneuerbare Energien ein wichtiger Ansatz zur Lösung des Problems. Auch mich beschäftigt dies sehr, da ich davon überzeugt bin, dass nur durch Forschung und die Suche nach Lösungen eine Veränderung erreicht werden kann. Die Photovoltaik beschäftigt sich mit Solarzellen und ist damit ein Gebiet, zu dem ich in meiner Arbeit mehr erfahren wollte. In diesem Zusammenhang bin ich auf die Grätzel-Zelle gestossen, welche mich vor allem deshalb fasziniert hat, als dass sie auf dem Prinzip der Photosynthese basiert. Ich war sehr beeindruckt von dieser Idee und wollte unbedingt mehr dazu erfahren. Später bin ich auch auf die Maturitätsarbeit von Julian Arnold gestossen. Das grösste Interesse hatte ich am Elektrolyten der Grätzel-Zelle. Da Julian Arnold in seiner Arbeit „Grätzel-Zelle – Einfluss des Elektrolyten auf die elektrischen Eigenschaften einer Grätzel-Zelle“ ^[1] bereits die Zusammensetzung des Lösungsmittels untersucht hat, habe ich mich dazu entschieden, mich mit der zweiten Komponente, dem Redoxpaar zu beschäftigen. Dieses ist eine sehr wichtige Komponente der Grätzel-Zelle, da es für den Ladungstransport verantwortlich ist.

Da mich die beiden Schulfächer Chemie und Physik sehr interessieren, war ich sehr glücklich, ein Thema gefunden zu haben, das diese beiden Wissenschaften optimal verbindet.

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei meiner Betreuerin Natalie Streiff bedanken, welche mir im Labor, sowie im gesamten Arbeitsprozess immer zur Seite stand. Dank ihrer kompetenten, grossartigen und organisierten Betreuung war es mir möglich, mich voll auf die Arbeit zu konzentrieren.

Auch möchte ich meinem Korreferenten Patrick Spengler für seine Unterstützung im physikalischen Teil der Arbeit danken.

Zudem gilt mein Dank auch dem Laboranten Heinz Schnyder, der mich sehr gut in meiner Arbeit im Labor unterstützt hat.

Ein weiterer Dank geht an Julian Arnold, der mir seine Arbeit zur Verfügung gestellt hat und offen war für meine Fragen.

Zudem möchte ich auch Edith Chevrier und Luis Greipl für die Korrekturlesung und das konstruktive Feedback danken.

Zum Schluss möchte ich meiner gesamten Familie für ihre grossartige Unterstützung während meiner gesamten Arbeitsphase danken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Geschichte der Grätzel-Zelle.....	2
2.2	Wirtschaftliche Bedeutung.....	3
2.3	Anwendungsfelder der Grätzel-Zelle.....	3
2.4	Aufbau und Funktion der Grätzel-Zelle.....	4
2.4.1	Die Photoelektrode.....	4
2.4.2	Die Gegenelektrode.....	4
2.4.3	Der Elektrolyt.....	4
2.4.4	Funktionsprinzip.....	5
2.5	Kennwerte zur Beschreibung der elektrischen Eigenschaften.....	7
2.5.1	Einfluss der Strahlung.....	8
2.5.2	Einfluss der Temperatur.....	9
3	Materialien und Methoden	10
3.1	Grundüberlegungen.....	10
3.1.1	Lösungsmittel.....	10
3.1.2	Elektrolyten und Berechnung der Stoffmengen.....	10
3.2	Vorexperiment.....	12
3.2.1	Zusammenfassung.....	12
3.2.2	Versuchsdurchführung.....	12
3.2.3	Messprotokoll.....	13
3.2.4	Beurteilung.....	13
3.3	Materialien.....	14
3.4	Methoden.....	14
3.4.1	Herstellung der Elektrolyte.....	14
3.4.2	Herstellung der Grätzel-Zellen.....	16
3.4.3	Messungsaufbau.....	17
3.4.4	Messungsablauf.....	17
4	Resultate	18
4.1	Tabellen.....	18
4.2	Darstellungen der Messresultate.....	20
4.2.1	I ₂ /I ₃ ⁻ -Elektrolyt.....	20
4.2.2	Fe ²⁺ /Fe ³⁺ -Elektrolyten.....	22
4.2.3	SCN ⁻ /(SCN) ₃ ⁻ -Elektrolyt.....	25
4.2.4	Br ⁻ /Br ₃ ⁻ -Elektrolyt.....	26
4.3	Ranglisten.....	27
4.3.1	Kurzschlussstrom.....	28
4.3.2	Leerlaufspannung.....	29
4.3.3	Ideale Leistung.....	30
4.4	Vergleich mit einem herkömmlichen Elektrolyten.....	31
4.5	Interpretation der Vergleiche.....	32
5	Diskussion	33
5.1	Fragestellungen.....	33
5.1.1	Funktion und wirtschaftliche Bedeutung der Grätzel-Zelle.....	33

5.1.2	Welche Redoxpaare eignen sich als Alternativen zum gängigen Elektrolytsystem	33
5.2	Schlussfolgerung und Ausblick	36
5.3	Reflexion.....	36
6	Abkürzungsverzeichnis.....	37
7	Literaturverzeichnis	38
8	Abbildungsverzeichnis	41
9	Tabellenverzeichnis	43
10	Anhang.....	44
10.1	Materialliste.....	44
10.2	Stoffeigenschaften der verwendeten Stoffe und Lösungsmittel	45
10.2.1	Molare Masse Feststoffe	45
10.2.2	Eigenschaften Lösungsmittel.....	45
10.3	Messtabellen	46
10.3.1	Elektrolyt E1	46
10.3.2	Elektrolyt E2	47
10.3.3	Elektrolyt E3	48
10.3.4	Elektrolyt E4	49
10.3.5	Elektrolyt E5	50
10.3.6	Elektrolyt E6	51
10.3.7	Elektrolyt E7	52
11	Arbeitsjournal.....	54
12	Authentizitätserklärung	57

1 Einleitung

Herkömmliche Solarzellen basieren auf dem sogenannten p-n-Kontakt¹, einem Kontakt zwischen p-Halbleiter und n-Halbleiter. Im Bereich des Kontaktes entsteht ein elektrisches Feld, in dem angeregte Elektronen beschleunigt werden. Dadurch wird ein Photostrom² erzeugt.

In den letzten Jahren konnte sich vor allem die Siliziumzelle durchsetzen, da sie eine hohe Effektivität und eine geringe Giftigkeit der Materialien aufweist. Da sehr reines Material benötigt wird, um einen guten Elektronentransport durch die Siliziumschichten zu ermöglichen, ist die Produktion der Siliziumzelle jedoch sehr aufwendig und kostenintensiv.^[2] Aus diesem Grund sind Solarzellen heute nicht konkurrenzfähig mit Energiequellen wie Kernkraft- oder Kohlewerken. Im Hinblick auf den Klimawandel wäre dies jedoch wichtig.

Ein Lösungsansatz, der eine günstige Alternative zur Siliziumzelle schafft, ist die Entwicklung der Grätzel-Zelle, oder auch farbstoffsensibilisierten Solarzelle. Sie ist in ihrem Aufbau relativ simpel und kostengünstig. Ein wichtiger Bestandteil der Grätzel-Zelle ist der Elektrolyt, welcher aus einem Lösungsmittel und einem Redoxpaar besteht. 2016 hat Julian Arnold bereits eine Maturitätsarbeit verfasst, in der er das im Elektrolyten enthaltene Lösungsmittel untersuchte. Seine Versuche zeigten, dass Grätzel-Zellen, welche ein Lösungsmittel aus Wasser und Ethanol in einem Verhältnis von 3:2 enthielten, die höchsten elektrischen Werte erreichen konnten.^[1] In dieser Arbeit wird deshalb dieses Lösungsmittel verwendet, um eine weitere Komponente des Elektrolyten zu untersuchen, das Redoxpaar. Bisher wird in Grätzel-Zellen meist das Redoxpaar I_2/I_3^- verwendet. Ziel der Arbeit war es zu verstehen, wie eine Grätzel-Zelle funktioniert und welche Bedeutung sie für die Wirtschaft und die Energiegewinnung hat. Ein weiteres Ziel ist, nach Alternativen zu diesem gängigen Elektrolytensystem, welches als toxisch bewertet wird, zu suchen und diese zu bewerten. Ausserdem sollen die Auswirkungen des Redoxpaares auf den Elektrolyten und auf die elektrischen Eigenschaften der Zelle aufgezeigt werden. Dafür werden Aspekte wie die Farbe des Elektrolyten oder das enthaltene Gegen-Ion berücksichtigt.

Für diesen Versuch werden im Labor sechs verschiedene Elektrolyten hergestellt, die sich in unterschiedlichen Aspekten unterscheiden. Diese werden Zuhause in selbst gebauten Grätzel-Zellen unter gleichen Bedingungen belichtet, um ihre elektrischen Eigenschaften zu messen. Zum Schluss werden die selbst hergestellten Elektrolyten mit einem herkömmlichen Elektrolyten verglichen.

¹ p-n- Kontakt= Materialübergang in Halbleiterkristallen zwischen Bereichen mit unterschiedlicher Dotierung.

² Photostrom= elektrischer Strom, der durch herausgeschlagene Elektronen verursacht wird

2 Grundlagen

2.1 Geschichte der Grätzel-Zelle

Die Grätzel-Zelle, die auch farbstoffsensibilisierte Solarzelle oder DSSC, Dye Sensitized Solar Cell genannt wird, wurde nach ihrem Erfinder Prof. Dr. Michael Grätzel benannt. Sie ist eine neuartige Solarzelle, welche auf Farbstoffbasis arbeitet und eine von der Natur inspirierte Alternative zur Siliziumzelle darstellt. Das Vorbild der Zelle war die natürliche Photosynthese, bei welcher Chlorophyll unter Sonneneinstrahlung Elektronen freisetzt, welche durch chemische Reaktionen chemische Energie in Form von Glukose darstellen. Der erste Prototyp einer Grätzel-Zelle wurde 1988 vom Grätzel-Team an der ETH Lausanne getestet und 1991 fertiggestellt. Ein Jahr später, 1992 wurde die Zelle dann patentiert.^[3] In der Zeitschrift NATURE wurde 1991 erstmals über einen für kommerzielle Anwendungen interessanten Wirkungsgrad von 7.9 % berichtet.^[4] Inzwischen konnte dieser Wirkungsgrad im Labor auf 10-12% gesteigert werden.^[5]



Abbildung 1 Der Erfinder der Grätzel-Zelle Michael Grätzel vor dem SwissTech Convention Center in Lausanne. Das Gebäude nutzt Grätzel-Zellen zur Stromerzeugung.

2.2 Wirtschaftliche Bedeutung

Bei der Betrachtung des Wirkungsgrades verschiedener Solarzellen, muss stets zwischen Labormustern und Serienfertigungen unterschieden werden. Labormuster haben grundsätzlich einen höheren Wirkungsgrad, da bei der industriellen Herstellung häufiger Kristallfehler³ und Verunreinigungen auftreten.

Eine Grätzel-Zelle hat einen industriellen Wirkungsgrad von 8,6%. Im Labor konnten bereits Werte von 10-12% erreicht werden. Monokristalline Siliziumzellen sind wesentlich teurer als Grätzel-Zellen. Dies liegt vor allem daran, dass sie einen hohen Energie- und Materialeinsatz bei der Herstellung benötigen. Im Labor konnten monokristalline Siliziumzellen jedoch bereits Wirkungsgrade in der Grössenordnung von 25% erreichen. Serienfertigungen haben meist einen Wirkungsgrad zwischen 15-18%.^[5]

Tabelle 1 Vergleich der Wirkungsgrade von verschiedenen Solarzellen. Die Grätzel-Zelle hat einen, vergleichsweise niedrigen industriellen Wirkungsgrad.

Material	industrieller Wirkungsgrad	Laborwirkungsgrad
Monokristallines Silizium	15 bis 18 %	25 %
polykristallines Silizium	13 bis 16 %	20 %
amorphes Silizium	5 bis 7 %	10 %
mikromorphes Silizium	11,9 %	
CIGS	11 bis 15 %	20,3 %
Cadmiumtellurid	5 bis 12 %	16 %
GaInP/GaInAs/Ge		41,1 %
Kohlenwasserstoff-Verbindungen	≤ 3 %	8,3 %
Grätzel-Zellen	8,6 %	10 bis 12 %

Aufgrund des niedrigen Wirkungsgrades wird eine kommerzielle Nutzung der Grätzel-Zelle bisher nicht als sinnvoll angesehen, weshalb die Grätzel-Zelle keine grosse wirtschaftliche Bedeutung hat.^[6] Die Nutzung könnte jedoch durch intensivere Forschung gefördert werden.

2.3 Anwendungsfelder der Grätzel-Zelle

In der Vergangenheit waren die Gestaltungsmöglichkeiten für Solarzellen sehr gering, da diese meist zur reinen Energieerzeugung genutzt wurden. Meist musste sich die Gestaltung an der blauen bzw. schwarzen Farbe und der vorgegebenen Panelgrösse orientieren. Mittlerweile werden Solarzellen auch in der Architektur verwendet. Diese können beispielsweise als Fassaden eingesetzt werden und ersetzen somit bisher verwendete Materialien, wie Glas, Naturstein, Keramik, etc. Ausserdem können Solarmodule auch als Sonnenschutz dienen. Dabei wird die Sonnenstrahlung von den Solarzellen aufgefangen und erreicht somit den dahinter liegenden Raum nicht. Grätzel-Zellen gelten als semitransparente Solarzellen, welche das Sonnenlicht diffus und gleichmässig in Innenräume bringen und reflektieren. Dies macht sie besonders attraktiv für zukünftige Anwendungen in Architektur und Design.^[7]

³ Kristallfehler= Unregelmässigkeit in einem Kristallgitter

2.4 Aufbau und Funktion der Grätzel-Zelle

Die Grätzel-Zelle kann grundsätzlich in drei Komponenten unterteilt werden: Die Photoelektrode, an der die Lichtabsorption erfolgt und die Ladungsträger generiert werden, die Gegenelektrode, an der die Reduktion des Elektrolyten erfolgt und der Elektrolyt selbst, der für den Ladungstransport zuständig ist und das Zellvolumen füllt.^[9]

2.4.1 Die Photoelektrode

Die Photoelektrode besteht aus einem leitfähigen FTO-Glas (Fluorine doped TinOxide) auf der eine dünne Schicht Titanoxid (TiO_2) aufgetragen ist. Diese nanokristalline Schicht absorbiert den Farbstoff, der für die Lichtabsorption verantwortlich ist. Durch ihre nanokristalline Eigenschaft kann die Oberfläche, auf der der Farbstoff absorbiert ist, stark vergrößert werden. Der Farbstoff sollte gut von der Titanoxidschicht absorbiert werden können, da die Injektionsrate der Elektronen stark vom Abstand des Farbstoffes zum Halbleiter abhängt. Er sollte ausserdem über ein breites solares Absorptionsspektrum verfügen und eine hinreichende Stabilität aufweisen.^[9]

2.4.2 Die Gegenelektrode

Die Gegenelektrode besteht ebenfalls aus leitfähigem FTO-Glas, welches mit Platin oder Graphit beschichtet ist. Im experimentellen Teil dieser Arbeit wurde für die Beschichtung der Gegenelektrode Graphit verwendet. Die Graphitschicht dient als Elektronenkatalysator und muss grosse Stromaustauschdichten erlauben, um keinen inneren Widerstand zu erzeugen.^[9]

2.4.3 Der Elektrolyt

Der Elektrolyt ist verantwortlich für den Ladungstransport zwischen dem Front- und Rückkontakt. Er besteht aus einem Lösungsmittel und einem darin gelösten Redoxpaar. Dieser Elektrolyt muss nach «2 Aufbau und Funktion der Farbstoffsolarzelle»^[9] bestimmte Anforderungen erfüllen:

- Das Redoxniveau des Elektrolyten muss oberhalb vom Grundzustand des Farbstoffes liegen, damit dieser reduziert werden kann.
- Der Transport grosser Stromdichten muss möglich sein, damit kein innerer Zellwiderstand entsteht.
- Um den Wirkungsgrad der Zelle nicht zu verringern, ist eine geringe Absorption im solaren Spektrum erforderlich.
- Der Elektrolyt muss eine hohe Stabilität aufweisen, um eine lange Lebensdauer der Zelle zu gewährleisten.
- Er sollte möglichst wenig toxische Stoffe beinhalten.^[9]

Bis jetzt hat sich I^-/I_3^- als einer der effizientesten Redoxmediatoren erwiesen.^[10]

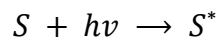
2.4.4 Funktionsprinzip

Sonnenstrahlung entsteht bei einem nuklearen Prozess im Sonneninneren, der dazu führt, dass die Oberfläche der Sonne etwa 5600°C heiss wird. Die Sonne strahlt ständig Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung in den Weltraum ab. Ein Teil dieser Energie erreicht die Erde.^[11]

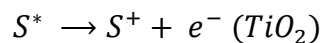
Fällt Licht auf eine Grätzel-Zelle, wird ein Elektron des Farbstoffes angeregt, welches auf ein höheres Energieniveau angehoben wird. Dieses geht in das geringfügig niedrigere Leitungsband des Titanoxids über. Es entsteht ein «Elektronenloch» im Farbstoff. Hiermit ist die Ladung getrennt und ein p-n-Übergang aus der Siliziumzelle simuliert.^[9]

Dieser Vorgang kann chemisch detaillierter dargestellt werden:

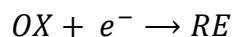
Zu Beginn werden durch einfallende Lichtstrahlen Farbstoffteilchen durch ein Photon angeregt (Vorgang 1)^[9]:



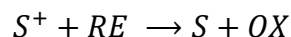
Die Farbstoffteilchen injizieren angeregte Elektronen in die TiO₂-Schicht (Vorgang 2)^[9]:



Die Elektronen wandern durch die TiO₂-Schicht zum Frontkontakt. Die Einzelheiten dieses Ladungstransportes werden hier nicht behandelt. Nach Durchlaufen des äusseren Stromkreises, gelangen die Elektronen durch Reduktion des im Elektrolyten enthaltenen Redoxpaares wieder zurück in die zellinneren Prozesse (Vorgang 3)^[9]:



Durch Diffusion gelangt das reduzierte Redoxpaar zum oxidierten Farbstoff. Durch die anschliessende Reduktion des Farbstoffes ist der Kreislauf geschlossen (Vorgang 4)^[9]:



Die beschriebenen Schritte laufen in der Realität simultan ab.

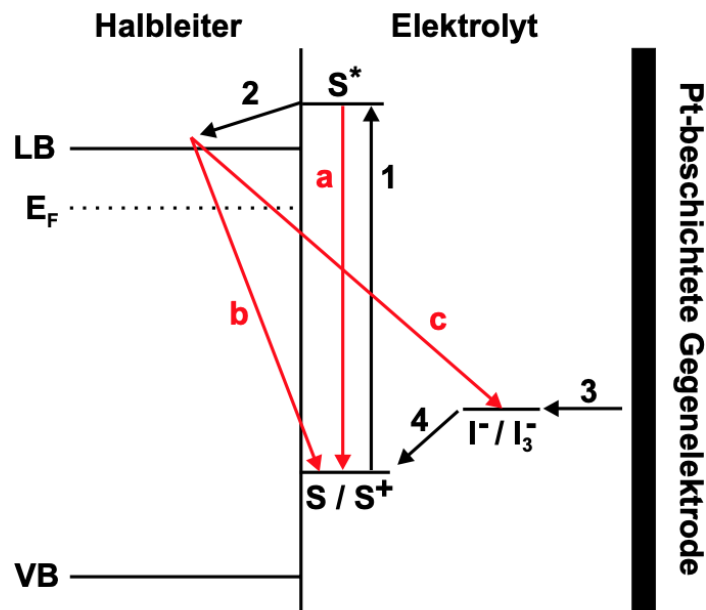
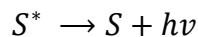


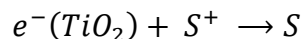
Abbildung 2 Vorgänge in der Grätzel-Zelle. Die schwarzen Pfeile 1,2,3,4 sind die oben beschriebenen Vorgänge. Die roten Pfeile a,b,c sind die beschriebenen Verlustmechanismen.

Liefen nur diese, zu äusseren Strom führenden elementaren Prozesse in der Zelle ab, so würde die Grätzel-Zelle eine Effizienz von fast 100% erreichen.^[9] Dies ist in der Realität jedoch nicht der Fall, da diesen Prozessen hauptsächlich drei Verlustmechanismen entgegenwirken, wobei vor allem die letzten beiden Auswirkungen auf die Effizienz der Zelle haben.^[9]

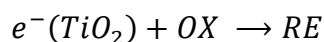
- Der Farbstoff kann ein Photon aussenden und damit wieder vom angeregten Zustand zum Grundzustand zurückkehren, ohne ein Elektron injiziert zu haben (Verlustmechanismus a)^[9]:



- Elektronen, welche vom Farbstoff in die TiO_2 -Schicht injiziert wurden, werden zurück auf den Farbstoff übertragen (Verlustmechanismus b)^[9]:



- Elektronen, welche vom Farbstoff in die TiO_2 -Schicht injiziert wurden, werden direkt auf das Redoxsystem übertragen (Verlustmechanismus c)^[9]:



2.5 Kennwerte zur Beschreibung der elektrischen Eigenschaften

Zur Beschreibung elektrischer Eigenschaften von Solarzellen werden folgende Kennwerte eingesetzt:

- Die **Leerlaufspannung** V_{oc} ist die erzeugte elektrische Spannung bei voller Besonnung, wenn beide Pole miteinander verbunden sind. Es wird also kein Strom entnommen.^[8]
- Der **Kurzschlussstrom** I_{sc} ist die elektrische Stromstärke, die bei voller Besonnung und einem Kurzschluss⁴ gemessen werden könnte. Dabei wird keine Spannung gemessen.^[8]
- Das Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom beschreibt die **ideale Leistung** P_{ideal} , die für die betrachtete Solarzelle bei einem rechteckigen Kurvenverlauf der Strom-Spannungs-Kennlinie erzielt werden könnte (siehe Abbildung 3).^[11] Die ideale Leistung wird in Formel [1] als Produkt von Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom dargestellt.^[11]

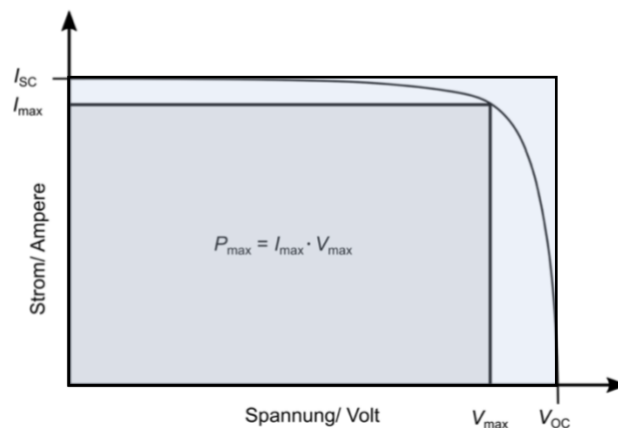


Abbildung 3 Schematische Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle mit der maximal erreichbaren Leistung P_{max} . Sie vereint die Kennwerte in einer Grafik. Das blaue Rechteck stellt die ideale Leistung dar.

- Der eigentliche Betrieb einer Solarzelle sollte so erfolgen, dass eine **optimale elektrische Spannung** V_{max} erzeugt wird. Dieser Punkt auf der Strom-Spannungs-Kennlinie wird als **Punkt maximaler Leistung (MPP= Maximum Power Point)** bezeichnet. Die maximale **Leistung** P_{max} einer idealen Solarzelle kann die ideale **Leistung** P_{ideal} nicht überschreiten. Im realen Fall liefert sie im MPP-Betrieb den **Strom** I_{max} bei einer **Spannung** V_{max} .^[12]
- Der **Füllfaktor FF** bezeichnet das Verhältnis zwischen maximaler und idealer Leistung. Dies wird in Formel [2] veranschaulicht.^[12]

⁴ Als Kurzschluss bezeichnet man eine nahezu widerstandslose Verbindung zweier Pole einer Spannungsquelle. Bei einem Kurzschluss wird keine Spannung gemessen.

- **Der Gesamtwirkungsgrad η** einer Grätzel-Zelle ist das Verhältnis aus der jeweils pro Fläche generierten elektrischen Leistung P_{max} und der eingestrahlenen Sonnenenergie P_{in} .^[13] Dieser wird in Formel [3] berechnet.

$$P_{ideal} = V_{oc} \cdot I_{sc} \quad [1]$$

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{ideal}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} < 1 \quad [2]$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad [3]$$

2.5.1 Einfluss der Strahlung

Wird eine unbeleuchtete Solarzelle betrachtet, so fließt kein Strom und so ist auch kein Spannungsunterschied zu erkennen. Fällt nun Licht auf die Solarzelle, so erhalten Elektronen die nötige Energie zum Überspringen der Energiebarriere. Die dadurch entstandene Asymmetrie der elektrischen Ladung führt zu einer Spannung als Ausdruck des Energieunterschiedes zweier Bereiche. Die Stromstärke ist linear von der Einstrahlung abhängig. Je mehr Einstrahlung, umso mehr Elektronen sind in der Lage die Energiebarriere zu überwinden. Die Spannung ist nahezu unabhängig vom auftreffenden Licht.^[12] Die ideale Leistung, welche sich als Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom errechnet, nimmt bei zunehmender Bestrahlung zu.

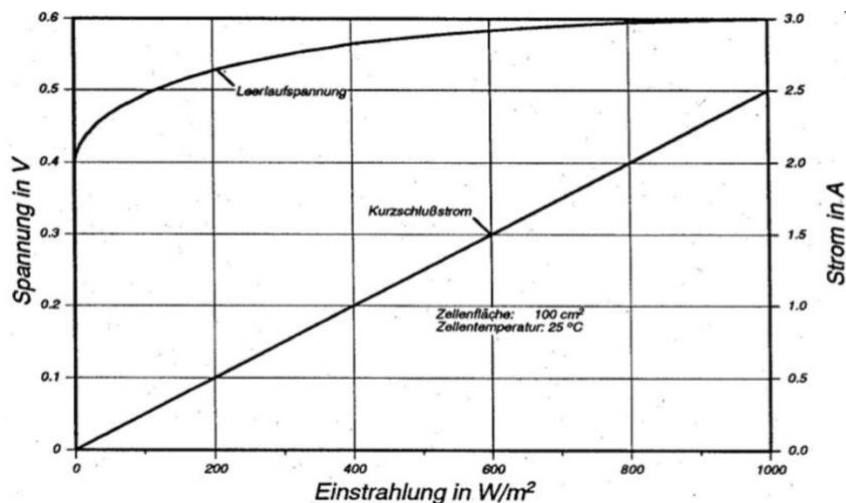


Abbildung 4 Abhängigkeit der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstromes von der Einstrahlung. Es ist eine lineare Abhängigkeit des Stromes von der Bestrahlung zu erkennen.

2.5.2 Einfluss der Temperatur

Die Temperatur der Solarzelle hat stets Auswirkungen auf ihre elektrischen Eigenschaften. Es ist nach «7 Photovoltaik»^[12] bekannt, dass die Leerlaufspannung stark von der Temperatur abhängt. Dabei sinkt die Leerlaufspannung bei zunehmender Temperatur. Der Strom hingegen steigt geringfügig an. Insgesamt sinkt die Leistung der Solarzelle jedoch, da sie aus dem Produkt von Strom und Spannung besteht.^[12]

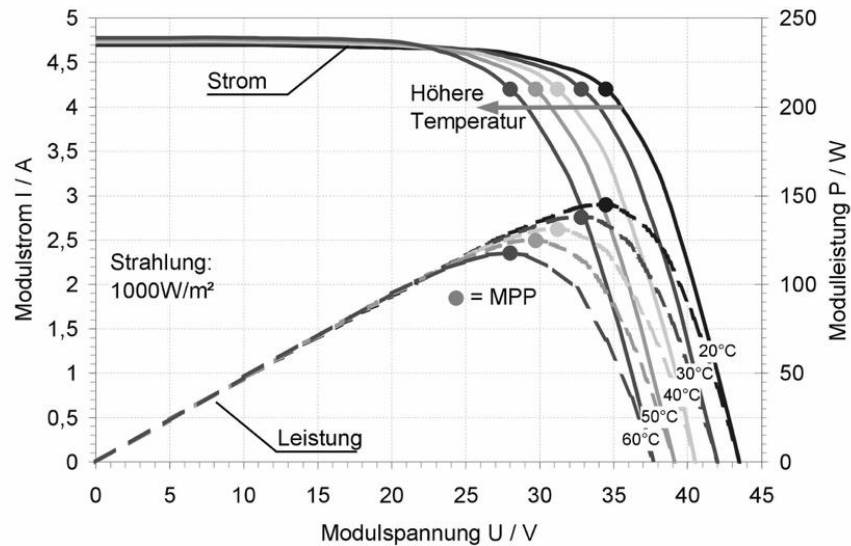


Abbildung 5 Abhängigkeit der Leerlaufspannung, des Kurzschlussstromes und der Leistung von der Temperatur. Es ist klar ersichtlich, dass eine erhöhte Temperatur zu einer tieferen Spannung führt. Der Strom nimmt hingegen mit steigender Temperatur geringfügig zu. Die unteren Kurven zeigen wie sich die Leistung bei den verschiedenen Temperaturen verändert. Wie zu erkennen ist, nimmt die Leistung bei steigender Temperatur ab.

3 Materialien und Methoden

3.1 Grundüberlegungen

Für die Arbeit wurden 6 verschiedene Elektrolyten selbst hergestellt. Diese enthielten alle dasselbe Lösungsmittel und unterschiedliche Redoxpaare. Im Folgenden werden die Grundüberlegungen zu den verwendeten Stoffen präzisiert.

3.1.1 Lösungsmittel

Als Lösungsmittel wurden Wasser und Ethanol (96%) in einem Verhältnis von 3:2 verwendet. Dieses Lösungsmittel wurde gewählt, da es sich in der Maturitätsarbeit von Julian Arnold als bestes Lösungsmittel erwiesen hat.^[1]

3.1.2 Elektrolyten und Berechnung der Stoffmengen

Um die zu verwendende Masse der Stoffe für die Elektrolyten zu berechnen, wird Formel [4] verwendet. Die Konzentrationen wurden dem stöchiometrischen Verhältnis der Stoffe im Elektrolyten angepasst:

$$\begin{aligned} m &= \text{Masse in Gramm} \\ M &= \text{Molare Masse} \\ c &= \text{Konzentration} \end{aligned} \qquad m = M \cdot c \cdot \frac{50\text{ml}}{1000\text{ml}} \qquad [4]$$

Elektrolyt E1

Das im E1 enthaltene Redoxpaar I^-/I_3^- wurde gewählt, da es als das meist verwendete Redoxpaar für Elektrolyten gilt und sich als effizientester Redoxmediator erwiesen hat. Dieser Elektrolyt wurde auf Basis des Elektrolyten der Maturitätsarbeit von Julian Arnold hergestellt. Aus diesem Grund wurden die von ihm gewählten Konzentrationen verwendet.

$$\text{Iod: } 253.81 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 0.25 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot \frac{50\text{ml}}{1000\text{ml}} = 3.1725 \text{ g}$$

$$\text{Kaliumiodid: } 166.00 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 0.125 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot \frac{50\text{ml}}{1000\text{ml}} = 1.0375 \text{ g}$$

Elektrolyt E2

Für den Elektrolyten E2 wurde das Redoxpaar $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ verwendet. Dasselbe Redoxpaar ist auch in Elektrolyt E3 und E6 enthalten. Diese Elektrolyten unterscheiden sich jedoch im verwendeten Salz, weshalb durch den Vergleich versucht wird, eine Aussage über den Einfluss des Gegen-Ions zu machen.

$$\text{Eisen(II)-sulfat: } 151.91 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 0.125 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot \frac{50\text{ml}}{1000\text{ml}} \cong 0.9494 \text{ g}$$

$$\text{Eisen(III)-nitrat: } 241.86 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 0.125 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot \frac{50\text{ml}}{1000\text{ml}} \cong 0.1512 \text{ g}$$

Elektrolyt E3

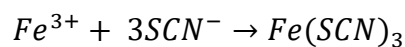
Wie bereits erwähnt, enthält E3 das Redoxpaar Fe^{2+}/Fe^{3+} .

$$\text{Eisen(II)-sulfat: } 151.91 \frac{g}{mol} \cdot 0.125 \frac{mol}{l} \cdot \frac{50ml}{1000ml} \cong 0.9494 g$$

$$\text{Eisen(III)-chlorid: } 162.21 \frac{g}{mol} \cdot 0.125 \frac{mol}{l} \cdot \frac{50ml}{1000ml} \cong 1.014 g$$

Elektrolyt E4

Elektrolyt E4 enthält das Redoxpaar $SCN^-/(SCN)_3^-$. Die verwendeten Stoffe sind Eisen(III)-chlorid und Ammonium-thiocyanat. Die beiden Stoffe reagieren in einem stöchiometrischen Verhältnis von 1:3 zu Eisen(III)-thiocyanat. Die Ionengleichung ist unter folgender Formel gegeben:



Damit der Elektrolyt Eisen-thiocyanat und Ammonium-thiocyanat im Verhältnis 1:1 enthält, muss das Anfangsverhältnis zwischen Eisen(III)-chlorid und Ammonium-thiocyanat 1:4 sein.

Dieser Elektrolyt wurde aufgrund seiner stark roten Farbe gewählt (dieses Gemisch kann deshalb übrigens auch als Kunstblut verwendet werden).^[14] Dadurch kann später der Einfluss der Farbe betrachtet werden.

Elektrolyt E5

Elektrolyt E5 enthält das Redoxpaar Br^-/Br_3^- . Dieses wurde aufgrund der Publikation «Electrolytes in Dye-Sensitized Solar Cells» von Jihuai Wu et al. gewählt.^[15] Für diesen Elektrolyten wurden folgende Stoffmengen verwendet:

$$\text{Kaliumbromid: } 119.01 \frac{g}{mol} \cdot 0.375 \frac{mol}{l} \cdot \frac{50ml}{1000ml} \cong 2.2314 g$$

$$\text{Eisen(II)-bromid: } 295.56 \frac{g}{mol} \cdot 0.125 \frac{mol}{l} \cdot \frac{50ml}{1000ml} \cong g$$

Elektrolyt E6

Wie schon erwähnt wurde, enthält auch E6 das Redoxpaar Fe^{2+}/Fe^{3+} mit dem Gegen-Ion Sulfat.

$$\text{Eisen(II)-sulfat: } 151.91 \frac{g}{mol} \cdot 0.25 \frac{mol}{l} \cdot \frac{50ml}{1000ml} \cong 1.8989 g$$

$$\text{Eisen(III)-sulfat: } 399.88 \frac{g}{mol} \cdot 0.125 \frac{mol}{l} \cdot \frac{50ml}{1000ml} \cong 2.4993 g$$

Elektrolyt E7

Elektrolyt E7 ist ein Elektrolyt der von ManSolar (www.mansolar.nl) bezogen wurde. Er dient dem Vergleich der selbst hergestellten Elektrolyten mit einem herkömmlichen Elektrolyten. Im Elektrolyten E7 ist das Redoxpaar I^-/I_3^- enthalten. Genauere Aussagen über Lösungsmittel, Stabilisatoren, etc. können leider nicht gemacht werden.

3.2 Vorexperiment

3.2.1 Zusammenfassung

Ziel dieses Experimentes war es zu prüfen, ob sich mit dem angewandten Vorgehen und den verwendeten Lösungsmitteln Grätzel-Zellen bauen lassen. Die Leerlaufspannung und der Kurzschlussstrom beider Zellen wurde während ca. 2 Minuten beobachtet und notiert. Es konnten während dieser Zeit relativ konstante Werte beobachtet werden, was diese Vorgehensweise für weitere Experimente bestätigt.

3.2.2 Versuchsdurchführung

Herstellung und Einfärben der Titanoxidplatte:

Es wird eine Hand voll getrockneter Hibiskusblüten mit kochendem Wasser übergossen und 10min ziehen gelassen. Später werden die bereits mit Titanoxid beschichteten FTO-Glasplatten für 15min in den Hibiskustee gelegt, bis keine weiße Beschichtung mehr zu sehen ist. Danach wurden die eingefärbten Platten mit destilliertem Wasser abgespült und mit einem Papiertuch trocken getupft.

Herstellung der Gegenelektrode:

Für die Gegenelektroden werden unbeschichtete FTO-Platten auf ihre leitende Seite überprüft. Die leitende Seite lässt sich klar von der nichtleitenden unterscheiden, da auf dieser ein Widerstand gemessen werden kann. Die leitenden Seiten werden mit einem weichen Bleistift markiert. Im nächsten Schritt werden die leitenden Seiten mithilfe des weichen Bleistiftes schraffiert, und so mit Graphit beschichtet.

Herstellung des 1. Elektrolyten:

Für den ersten Elektrolyten wurden 0.127g Iod in 10ml Ethylenglykol unter Rühren aufgelöst. Der Lösungsprozess dauerte etwa 50 min. Danach wurden 1.03g Kaliumiodid dazugegeben und noch weitere 10 min mit dem Magnetrührer gerührt.

Herstellung des 2. Elektrolyten:

Zur Herstellung des zweiten Elektrolyten wurden 3.17g Iod in 20ml Ethanol (96%) unter Rühren aufgelöst. Dies dauerte etwa 60 min. Danach wurden 1.03g Kaliumiodid in 30ml Wasser aufgelöst. Das Kaliumiodid hat sich nach wenigen Minuten vollständig gelöst.

Zusammenbauen der Grätzel-Zellen:

Um die Zelle zusammenzubauen, wurde mit einer Pipette je einige Tropfen der Elektrolyten auf die Titanoxidplättchen gegeben. Nun wurde je eine Gegenelektrode mit der Graphitschicht nach unten und etwas verschoben (damit später Messungen gemacht werden können) auf den Elektrolyten gelegt. Der überschüssige Elektrolyt wurde mithilfe eines Papiertuches entfernt. Die Grätzel-Zellen wurden mithilfe von Klammern zusammengehalten. Mit einem Multimeter wurden Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom der beiden Zellen gemessen.

3.2.3 Messprotokoll

Tabelle 2 Messprotokoll für die beiden Elektrolyten des Vorexperimentes.

	1. Elektrolyt	2. Elektrolyt
Kurzschlussstrom (I_{sc})	33 bis 35.3 mA	3.3mA
Leerlaufspannung (V_{oc})	0.347-0.350 V	0.287-0.294 V

Alle Werte waren relativ konstant. Nach 10 min konnten bei allen Werten tendenziell leichte Verbesserungen der beiden Werte beobachtet werden. Über die Ursache dieser Verbesserung kann keine Aussage gemacht werden, da für den Versuch keine konstante Beleuchtung verwendet wurde.

3.2.4 Beurteilung

Es konnte gemessen werden, dass der 1. Elektrolyt sowohl einen höheren Kurzschlussstrom, wie auch eine höhere Leerlaufspannung aufwies. Es muss bedacht werden, dass beide Zellen nicht unter konstanten Bedingungen vermessen wurden. Es kann ausserdem keine Aussage über die Beleuchtung sowie die Temperatur gemacht werden.

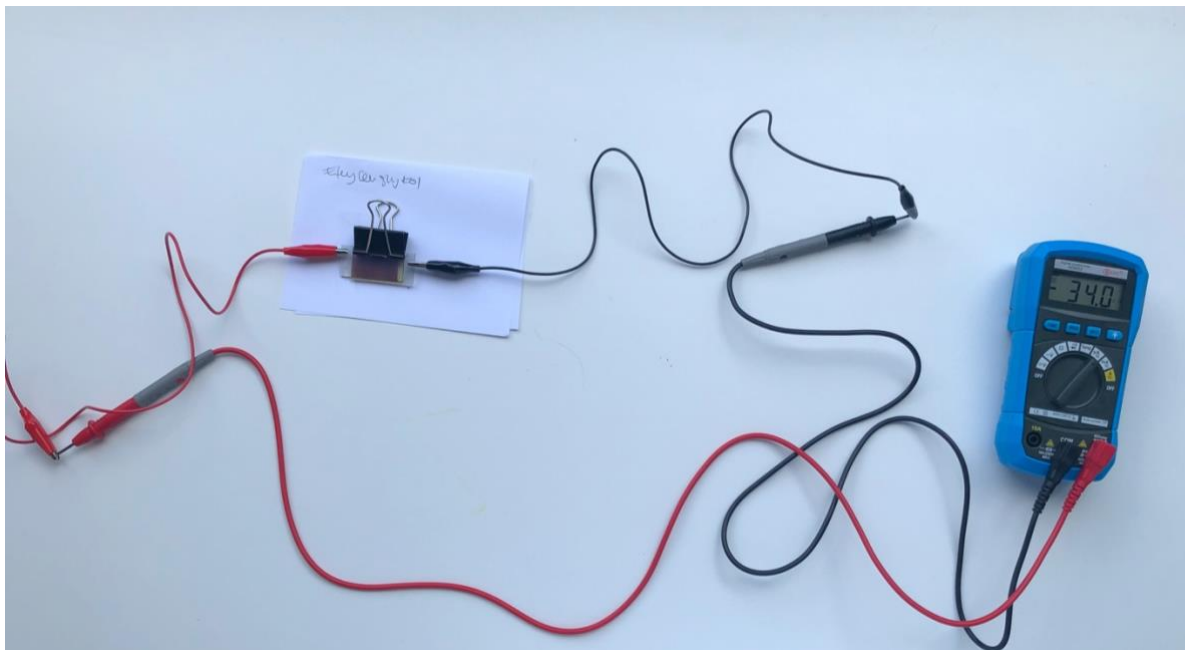


Abbildung 6 Der Kurzschlussstrom der 1. Grätzel-Zelle wird mithilfe eines Multimeters gemessen.

3.3 Materialien

Die Materialien für die Herstellung der Grätzel-Zellen wurden von ManSolar bezogen. Reagenzien, Materialien für die Messung und Herstellung der Elektrolyten wurden von der Kantonsschule Wiedikon zur Verfügung gestellt. Die vollständige Materialliste kann im Anhang unter 10.1 betrachtet werden.

3.4 Methoden

3.4.1 Herstellung der Elektrolyte

Es werden jeweils 50ml der Elektrolytlösungen hergestellt. Für die Herstellung der Elektrolyten E1, E2, E3, E4, E5, E6 wird als Lösungsmittel Wasser und Ethanol im Verhältnis von 3:2 verwendet, da dies das Lösungsmittel ist, welches auch Julian Arnold in seiner Arbeit verwendet hat.^[1]

Nach der Herstellung werden alle Elektrolyten mithilfe eines Trichters in Braunflaschen abgefüllt und somit lichtgeschützt aufbewahrt.

1. Elektrolyt E1: KI/I₂ in Wasser und Ethanol
2. Elektrolyt E2: FeSO₄/ Fe(NO₃)₃ in Wasser und Ethanol
3. Elektrolyt E3: FeSO₄/ FeCl₃ in Wasser und Ethanol
4. Elektrolyt E4: Fe(SCN)₃/NH₄SCN in Wasser und Ethanol
5. Elektrolyt E5: KBr /FeBr₃ in Wasser und Ethanol
6. Elektrolyt E6: FeSO₄/Fe₂SO₄ in Wasser und Ethanol

Herstellung des Elektrolyten E1

Es werden 3.17g Iod abgemessen und mit 30ml Ethanol (96%) in ein 50ml Becherglas gegeben. Die Suspension wird während 60 Minuten mithilfe eines Magnetrührkerns gerührt, bis keine Iodkristalle mehr sichtbar sind. Zeitgleich werden in einem zweiten 50ml Becherglas 1.04 g Kaliumiodid abgemessen und in 30ml Wasser gelöst. Dies löst sich unter Rühren mit einem Rührstab innerhalb einiger Sekunden.

Beide Lösungen werden zusammen in einem 50ml Becherglas während weiteren 5 Minuten gerührt

Analog dazu wird Elektrolyt E5 unter Verwendung von 2.23g Kaliumbromid und 1.85g Eisen(III)-bromid hergestellt. Abfälle bei der Herstellung der Elektrolyten E5 wurden im Behälter für Schwermetallsalzlösungen entsorgt.

Herstellung des Elektrolyten E2, E3 und E6

Für die Herstellung des Elektrolyten E2, werden in einem 50ml Becherglas mithilfe eines Magnetrührkerns 0.95g Eisen(II)-sulfat in 15ml Wasser während 15 Minuten aufgelöst. Zeitgleich wird in einem weiteren 50ml Becherglas 1.51g Eisen(III)-nitrat unter Rühren in 15ml Wasser aufgelöst. Die beiden Lösungen werden zusammen mit 20ml Ethanol in einem 50ml Becherglas während weiteren 5 Minuten gerührt.

Analog dazu werden Elektrolyten E3 und E6 hergestellt. Elektrolyt E3 enthält 0.95g Eisen(II)-sulfat und 1.01g Eisenchlorid und Elektrolyt E6 enthält 1.90g Eisen(II)-sulfat und 2.50g Eisen(III)-sulfat.

Herstellung des Elektrolyten E4

Zur Herstellung des Elektrolyten E4 werden Eisen(III)-chlorid in Ethanol gelöst. In einem zweiten Becherglas wird Ammonium-thiocyanat in Wasser gelöst. Das Verhältnis von Wasser zu Ethanol entspricht ca. 3:2. Es kann jedoch keine genaue Angabe gemacht werden. Das Verhältnis zwischen Eisen(III)-chlorid und Ammonium-thiocyanat beträgt 1:4. Auch über diese Stoffmengen kann keine genauere Aussage gemacht werden.



Abbildung 7 Zur Herstellung des Elektrolyten E4 wird mithilfe des Magnetrührkernes Eisen(III)-chlorid in Ethanol gelöst.

3.4.2 Herstellung der Grätzel-Zellen

Vorbereitung der Photoelektrode

Die Vorbereitung der Photoelektroden geschieht analog zum Vorexperiment. Die vorbereiteten FTO-Platten können auf Abbildung 9 betrachtet werden.

Beschichtung der Gegenelektrode mit Graphit

Für die Beschichtung der Gegenelektroden, wird das gleiche Verfahren wie im Vorexperiment angewendet. Die mit Graphit beschichteten FTO-Platten können auf Abbildung 10 betrachtet werden.

Befüllen der Elektrolyten und Zusammenbauen der Grätzel-Zelle

Vor der Verwendung der Elektrolyten wurden diese für mindestens 60 min mithilfe eines Magnetrührers gerührt.

Um die Zelle zusammenzubauen werden mit einer Pipette je einige Tropfen der Elektrolyten auf die Titanoxidplättchen gegeben. Darauf wird je eine Gegenelektrode mit der Graphitschicht nach unten und etwas verschoben, damit später Messungen gemacht werden können, auf den Elektrolyten gelegt. Der überschüssige Elektrolyt wird mithilfe eines Papiertuches entfernt. Mithilfe von Klammern werden die beiden Elektroden zusammengehalten.

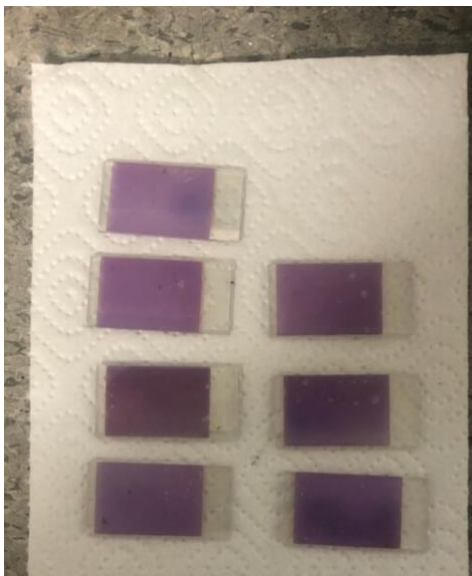


Abbildung 9 Die mit Titanoxid beschichteten FTO-Platten werden zum Trocknen auf ein Papiertuch gelegt.



Abbildung 8 Für die Herstellung der Gegenelektroden werden FTO-Glasplatten mithilfe eines Bleistiftes mit Graphit beschichtet.

3.4.3 Messungsaufbau

Zur Versuchsdurchführung wurde eine Lichtquelle in einem Abstand von 0,621 m von der Testzelle platziert. Dieser Abstand eignet sich aufgrund des Versuchsaufbaus. Während des ganzen Experimentes wurde die Temperatur zwischen 27 und 28°C gehalten. Diese wurde mit einem elektronischen Thermometer gemessen. Zur Regulation der Temperatur wurde ein Ventilator bzw. ein Heizkörper verwendet.

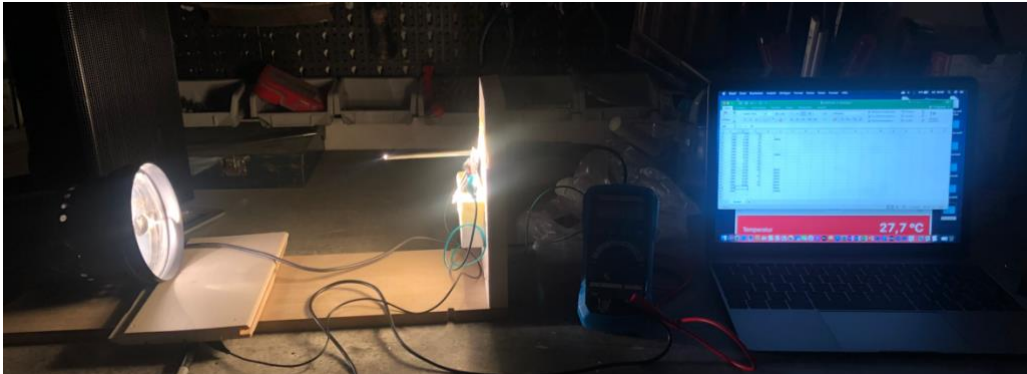


Abbildung 10 Der Messungsaufbau. Durch eine leichte Erhöhung wurde die Lichtquelle direkt auf die Zellen gerichtet. Mit dem Multimeter wurden Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung gemessen und mit Excel dokumentiert. Mithilfe des elektronischen Thermometers wurde die Temperatur überwacht.

3.4.4 Messungsablauf

Zur Messung wurden die Testzellen auf einem Holzstück platziert. Dies ist auf Abbildung 11 zu erkennen. Die Lichtquelle wurde bei Zeit 0 der Messung eingestellt. Mithilfe eines Multimeters konnten Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom gemessen werden.

Nach den ersten Messungen wurde festgestellt, dass die Aufnahme einer Strom-Spannungskennlinie wenig Sinn macht, da Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom schnell abnehmen. Aus diesem Grund wurden Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom über zwei Stunden gemessen, um die Veränderungen der Werte feststellen zu können. Für jeden Elektrolyten wurden zwei Zellen gebaut und einzeln gemessen. Diese sind jeweils mit _1 und _2 gekennzeichnet.

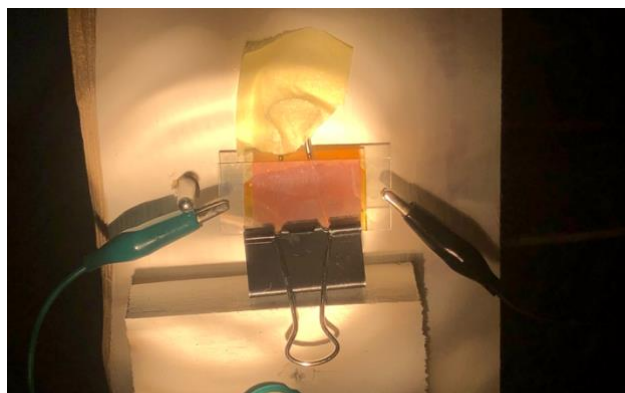


Abbildung 11 Der Messungsaufbau mit einer Testzelle nach 30 Minuten Messung. Mithilfe eines Klebebandes wurden die Zellen fixiert. Link, ist der Thermometer zu sehen.

4 Resultate

Hinweis: Elektrolyt E4 wird in die Rangliste und Diagramme einbezogen. Es muss jedoch beachtet werden, dass, wie bereits erwähnt, über die Stoffmengen keine präzise Aussage gemacht werden kann. Aus diesem Grund kann dieser Elektrolyt nicht nachgemacht werden. Im Folgenden werden die Messresultate der getesteten Grätzel-Zellen präsentiert. Eine Normierung des Stromes auf die aktive Fläche der Zellen wurde unterlassen.

Es kann hier nur die ideale Leistung P_{ideal} angegeben werden, sowie der Kurzschlussstrom I_{sc} und die Leerlaufspannung V_{oc} , da es sich, wie bereits erwähnt, durch die schnelle Abnahme der Grössen nicht als sinnvoll erwiesen hat. Es wird ausserdem darauf verzichtet, eine Aussage über die Belichtung zu machen, da eine solche nicht die erforderliche Genauigkeit hätte.

Es ist zusätzlich zu erwähnen, dass die folgenden Messresultate nur mit Messresultaten verglichen werden können, welche unter den gleichen Testbedingungen gemessen wurden.

4.1 Tabellen

In den Tabellen sind ausgewählte Messungen abgebildet. Die vollständigen Messresultate sind dem Anhang unter 10.3 zu entnehmen. In den folgenden Tabellen ist der Kurzschlussstrom I_{sc} , die Leerlaufspannung V_{oc} und daraus berechnet die ideale Leistung P_{ideal} dargestellt.

Tabelle 3 Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom der verschiedenen Zellen, gemessen nach 2 bzw. 10 Minuten.

Elektrolyt	I_{sc} (in μA) nach 2 Minuten	V_{oc} (in V) nach 2 Minuten	I_{sc} (in μA) nach 10 Minuten	V_{oc} (in V) nach 10 Minuten
E1_1	36.2	0.343	38.0	0.320
E1_2	36.6	0.343	34.2	0.317
E2_1	10.8	0.274	10.0	0.202
E2_2	11.1	0.263	10.4	0.229
E3_1	4.0	0.171	3.3	0.152
E3_2	4.1	0.154	3.4	0.135
E4_1	11.5	0.179	10.4	0.162
E4_2	11.6	0.177	10.3	0.154
E5_1	9.5	0.215	9.2	0.163
E5_2	9.6	0.237	9.2	0.164
E6_1	12.7	0.170	11.8	0.141
E6_2	12.2	0.172	11.4	0.142
E7_1	67.5	0.41	80.7	0.399
E7_2	66.9	0.419	80.0	0.404

Tabelle 4 Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom, gemessen nach 60 Minuten.

Elektrolyt	I_{sc} (in μA) nach 60 Minuten	V_{oc} (in V) nach 60 Minuten
E1_1	22.2	0.168
E1_2	26.5	0.168
E2_1	9.3	0.214
E2_2	9.5	0.223
E3_1	2.9	0.127
E3_2	2.8	0.126
E4_1	4.7	0.102
E4_2	4.8	0.112
E5_1	5.8	0.139
E5_2	6.7	0.146
E6_1	8.4	0.108
E6_2	8.8	0.114
E7_1	115.2	0.376
E7_2	117.6	0.378

Tabelle 5 ideale Leistung nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten auf 3 Kommastellen gerundet.

Elektrolyt	P_{ideal} (in μW) nach 2 Minuten	P_{ideal} (in μW) nach 10 Minuten	P_{ideal} (in μW) nach 60 Minuten
E1_1	12.417	12.160	3.730
E1_2	12.554	10.841	4.452
E2_1	2.959	2.020	1.990
E2_2	2.919	2.382	2.119
E3_1	0.684	0.502	0.368
E3_2	0.631	0.459	0.353
E4_1	2.059	1.685	0.479
E4_2	2.053	1.586	0.538
E5_1	2.043	1.500	0.806
E5_2	2.275	1.509	0.978
E6_1	2.159	1.664	0.907
E6_2	2.098	1.619	1.003
E7_1	27.68	32.199	43.315
E7_2	28.031	32.320	44.453

4.2 Darstellungen der Messresultate

Im Folgenden sind die Darstellungen der Messresultate für die verschiedenen Elektrolyten ersichtlich. Diese wurden nach dem verwendeten Redoxpaar geordnet und kommentiert.

4.2.1 I_2/I_3^- -Elektrolyt

Beim Betrachten der Abbildung 12 fällt auf, dass zwischen dem Start der Messung und Sekunde 1000 eine tendenzielle Verbesserung des Kurzschlussstromes zu beobachten ist. Nach diesem Zeitintervall nimmt der Kurzschlussstrom ab und erreicht zum Ende der Messung einen tieferen Wert als am Start der Messung. Abbildung 2 zeigt, wie die Leerlaufspannung über den gesamten gemessenen Zeitraum der Messung abnimmt. Die steilste Abnahme der Leerlaufspannung kann im Zeitintervall zwischen Sekunde 1500 und Sekunde 2000 beobachtet werden.

Der Abfall beider Werte könnte daran liegen, dass trotz Kühlung meiner Zellen die Temperatur leicht zugenommen hat. Wie in der Theorie beschrieben, hängt die Leerlaufspannung stark von der Temperatur ab. Dabei sinkt die Leerlaufspannung mit steigender Temperatur. Wie unter 3.4.4 beschrieben, wurde die Temperatur zwar während den Messungen konstant zwischen 27°C und 28°C gehalten, jedoch kann eine Erwärmung des Elektrolyten nicht ganz ausgeschlossen werden, da nur die Temperatur der Luft und nicht diejenige in der Zelle gemessen wurde.

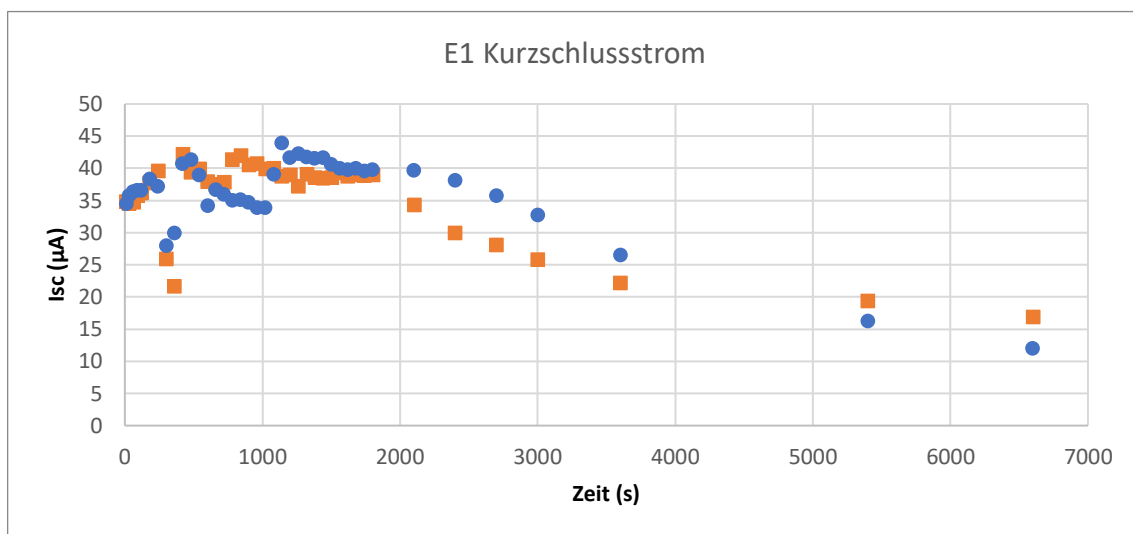


Abbildung 12 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E1. Messung E1_1 (orange) und Messung E1_2 (blau).

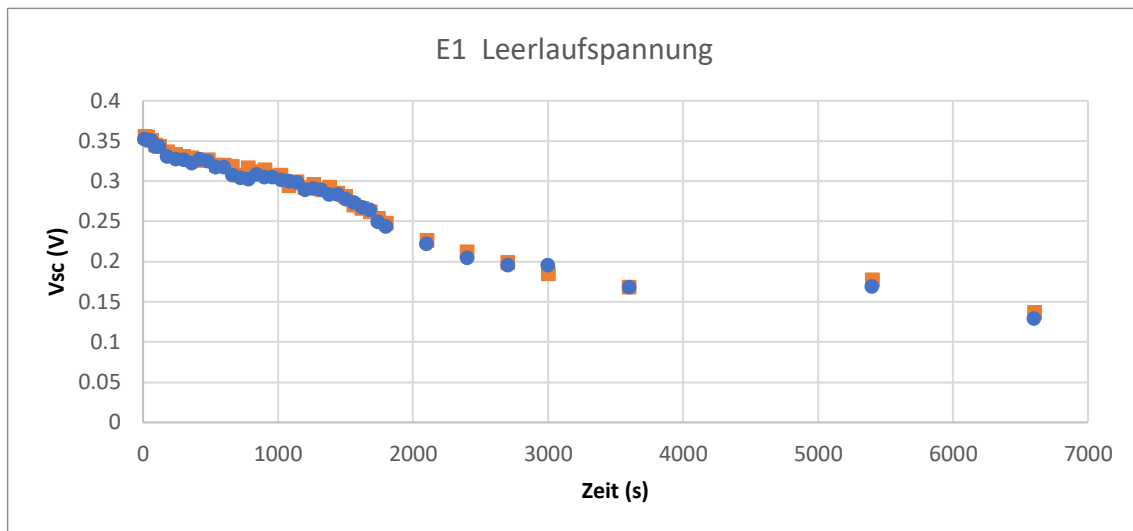


Abbildung 13 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E1. Messung E1_1 (orange) und Messung E1_2 (blau).

4.2.2 Fe²⁺/Fe³⁺-Elektrolyten

Die Abbildungen 15, 17, 19 zeigen für alle Messungen einen Einbruch in den Kurvenverlauf der Leerlaufspannung bei ca. 420 Sekunden. Da dies analog auch bei Abbildungen 21 und 23 zu sehen ist, wird vermutet, dass es sich um einen, wie er hier genannt wird, «Equilibrations-Effekt» handelt. Da die Zellen jeweils direkt von der Messung zusammengesetzt wurden, wird vermutet, dass sich das System zuerst equilibrieren musste. Dies könnte daran liegen, dass sich in der Reaktion zwischen den Reaktionspartnern zuerst ein Gleichgewicht einstellen musste. Nach dem leichten Einbruch ist bei allen Zellen eine relativ konstante Leerlaufspannung gemessen worden, was diese These weiter unterstützt.

Der Kurvenverlauf des Kurzschlussstromes hingegen, ist, wie in der Theorie erwähnt, von der Beleuchtungsstärke abhängig. Bei allen Messungen wurde die Lichtquelle zu Beginn der Messung eingeschaltet. Bei den Abbildungen 14, 16, 18 kann ein Abfall zu Beginn, eine darauffolgende konstante Phase und ein leichter Anstieg zum Schluss beobachtet werden. Eine Erklärung dafür könnte ebenfalls ein «Equilibrations-Effekt» oder aber auch, eine Veränderung der Beleuchtung sein. Elektrolyt E6 zeigt im Vergleich zu den Elektrolyten E2 und E3 erst später eine Stabilisation des Kurzschlussstromes.

Der allgemeine Abfall beider Kurven könnte durch ein Austrocknen oder Verdampfen des Lösungsmittels im Elektrolyten erklärt werden.

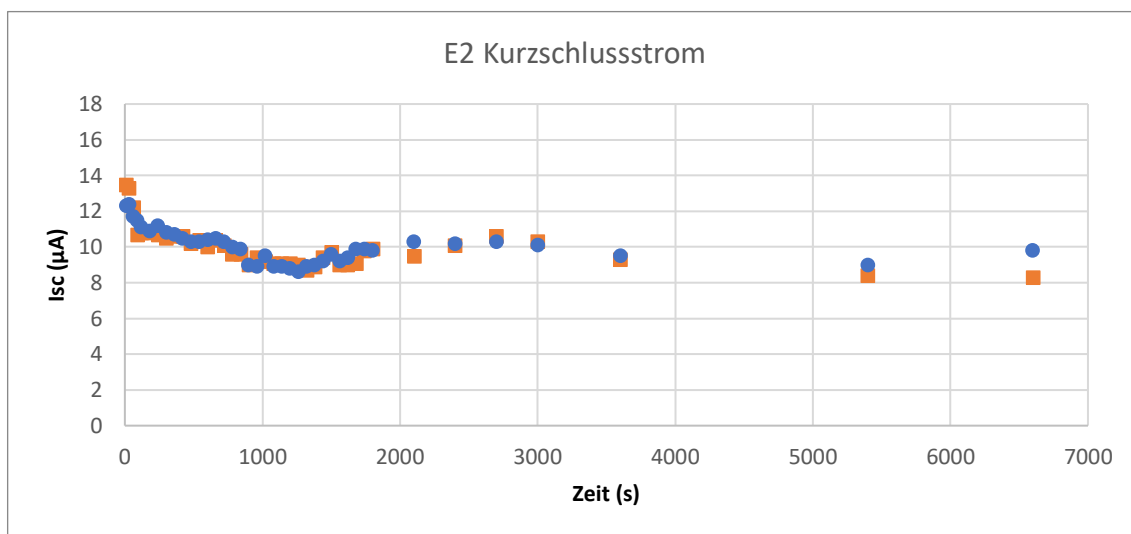


Abbildung 14 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E2. Messung E2_1 (orange) und Messung E2_2 (blau).

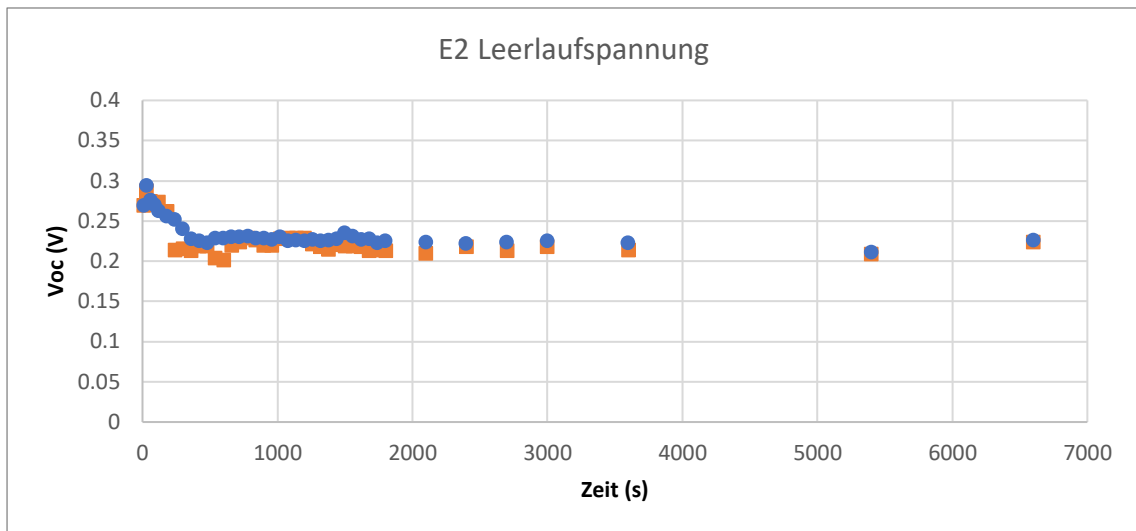


Abbildung 15 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E2. Messung E2_1 (orange) und Messung E2_2 (blau).

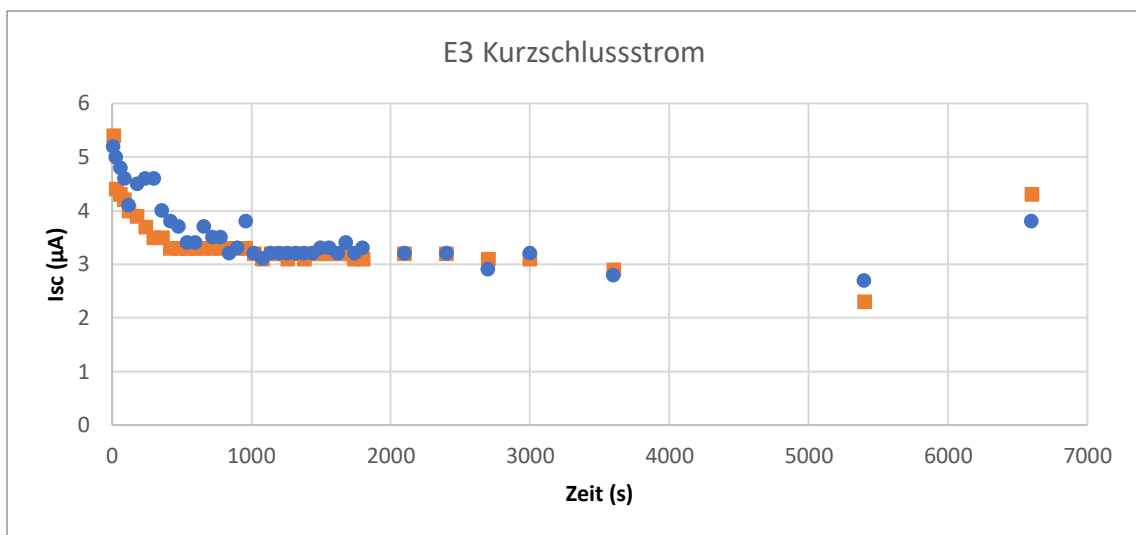


Abbildung 16 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E3. Messung E3_1 (orange) und Messung E3_2 (blau).

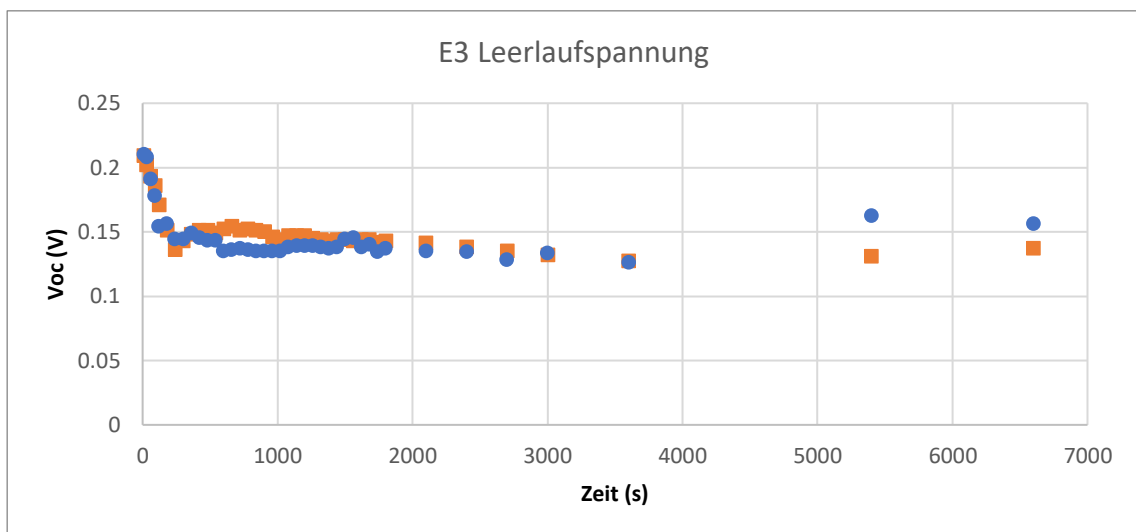


Abbildung 15 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E3. Messung E3_1 (orange) und Messung E3_2 (blau).

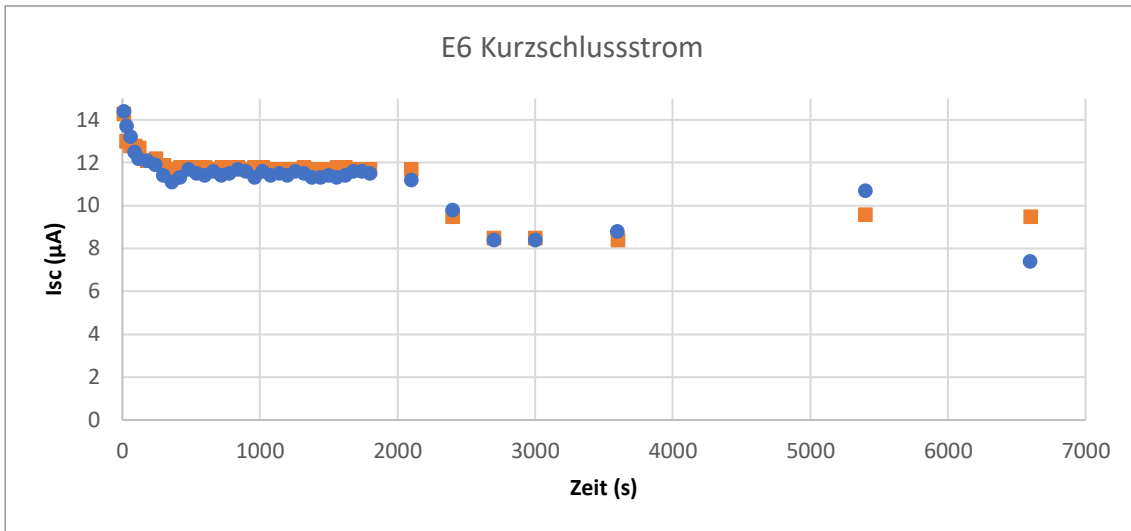


Abbildung 18 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E6. Messung E6_1 (orange) und Messung E6_2 (blau).

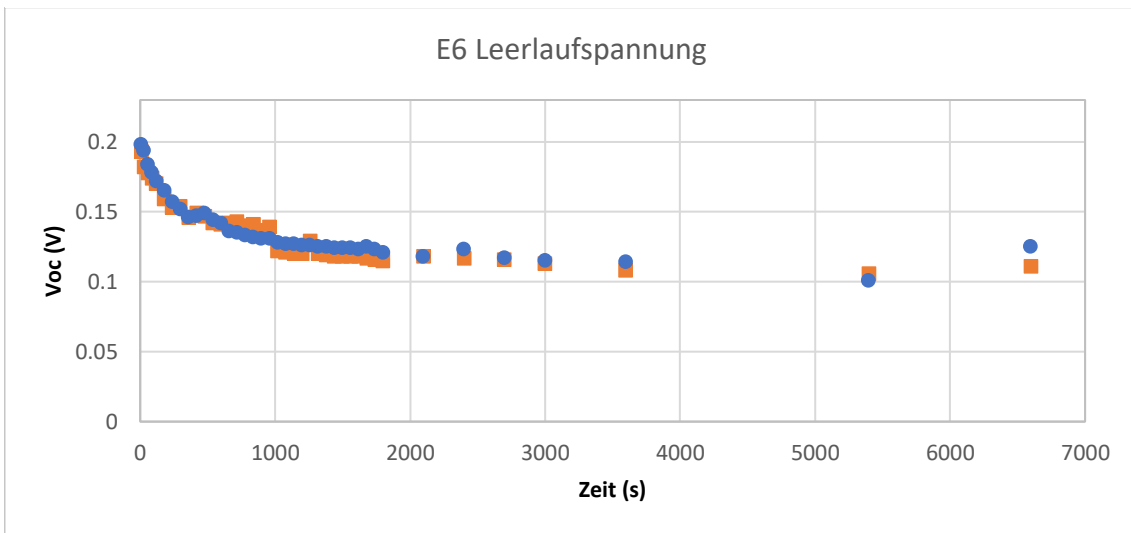


Abbildung 19 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E6. Messung E6_1 (orange) und Messung E6_2 (blau).

4.2.3 $\text{SCN}^-/(\text{SCN})_3^-$ -Elektrolyt

Auch auf Abbildung 21 kann, wie bei Abbildungen 15, 17, 19, ein Einbruch in den Kurvenverlauf der Leerlaufspannung beobachtet werden. Dieser kann mit gleicher Argumentation wie unter 4.2.2 erklärt werden.

Auch der Kurzschlussstrom des Elektrolyten E4 nimmt über den gemessenen Zeitraum ab. Die Kurve des Elektrolyten E4 zeigt zwar im Vergleich zu den anderen Elektrolyten einen zu Beginn weniger steilen Abfall des Kurzschlussstromes, zwischen 35 und 45 Minuten kann jedoch ein starker Abfall erkannt werden. Dieser könnte ebenfalls durch ein Austrocknen des Elektrolyten oder ein allmähliches Verdampfen des Lösungsmittels im Elektrolyten ausgelöst worden sein. Als Auswirkung davon müsste sich zuerst ein neues Gleichgewicht im Elektrolyten einstellen.

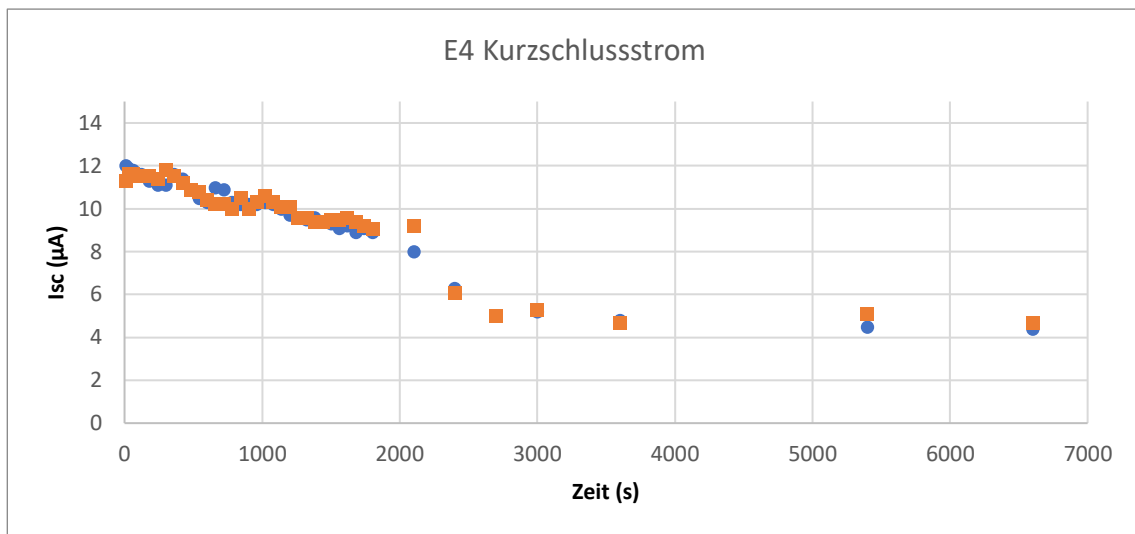


Abbildung 20 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E4. Messung E4_1 (orange) und Messung E4_2 (blau).

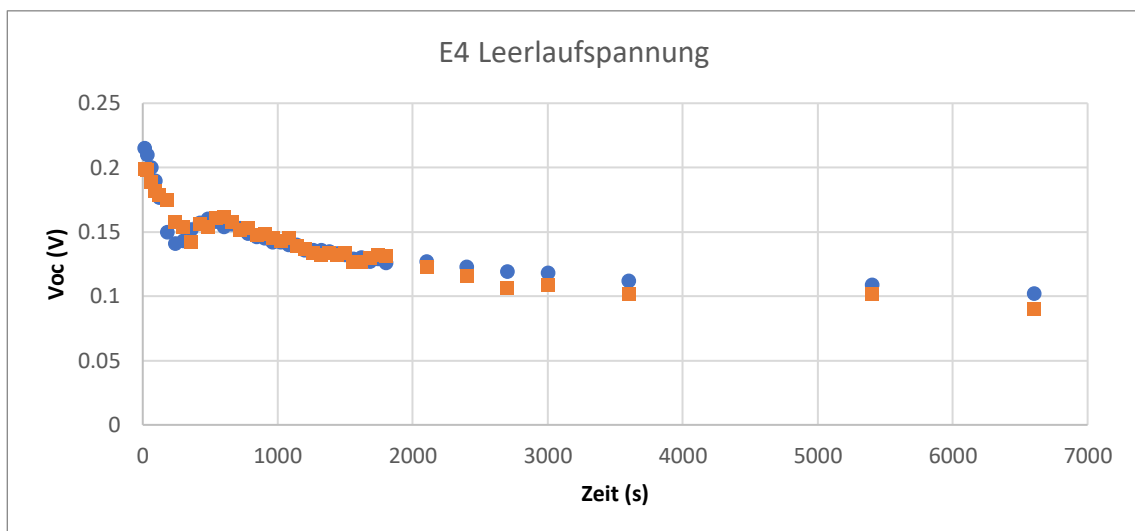


Abbildung 21 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E4. Messung E4_1 (orange) und Messung E4_2 (blau).

4.2.4 Br⁻/Br₃⁻-Elektrolyt

Auch der Elektrolyt E5 zeigt den oben erwähnten Abfall nach ca. 7 Minuten sehr ausgeprägt in Abbildung 23. Wie bereits beschrieben, könnte dieser Ausdruck eines «Equilibrations-Effektes» sein. Diese These wird durch den darauffolgenden relativ konstanten Kurvenverlauf unterstützt.

Der Kurvenverlauf des Kurzschlussstromes des Elektrolyten E5 zeigt einen Abfall zu Beginn und bleibt bis nach 30 Minuten relativ konstant. Es ist ausserdem auf Abbildung 22 erkennbar, dass danach bis 50 Minuten nochmals ein kleiner Abfall des Kurzschlussstromes stattfindet. Danach bleibt der Kurzschlussstrom relativ konstant.

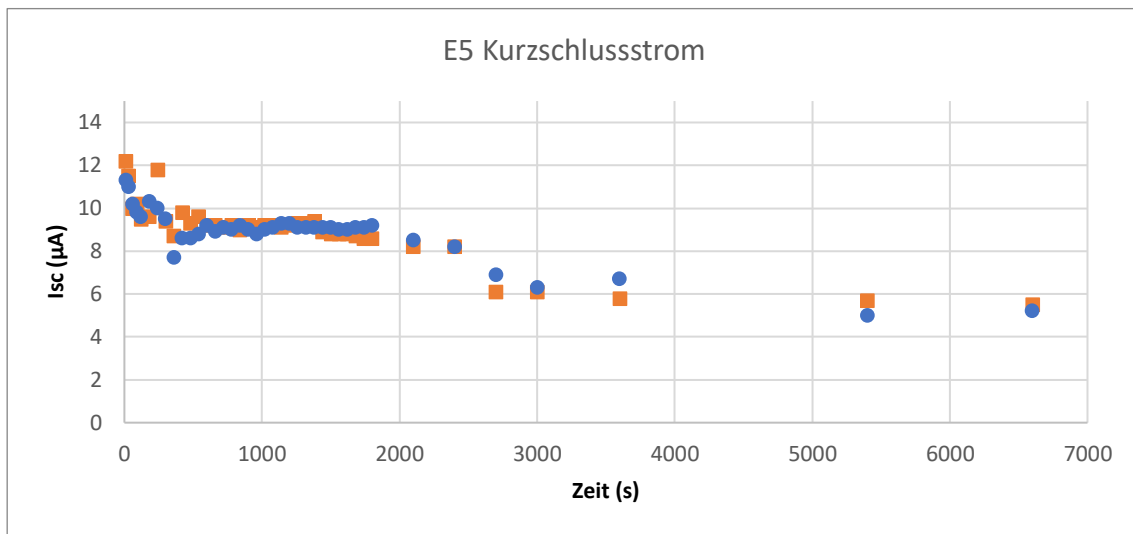


Abbildung 22 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E5. Messung E5_1 (orange) und Messung E5_2 (blau).

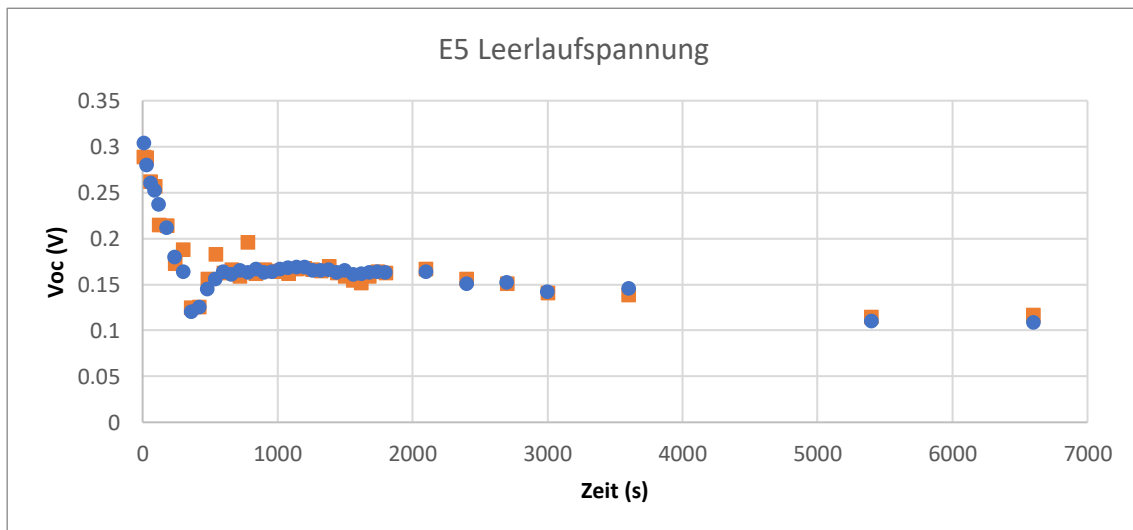


Abbildung 23 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E5. Messung E5_1 (orange) und Messung E5_2 (blau).

4.3 Ranglisten

Für die Ranglisten wird für jeden Elektrolyten der Durchschnitt des Kurzschlussstromes bzw. der Leerlaufspannung bzw. der idealen Leistung seiner beiden Testzellen verwendet. Elektrolyten, welche dasselbe Redoxpaar enthalten, wurden gleich eingefärbt. Der Elektrolyt E7 wurde nicht in die Ranglisten aufgenommen und dient einem späteren Vergleich der selbst hergestellten Elektrolyten mit einem herkömmlichen Elektrolyten.

4.3.1 Kurzschlussstrom

Die Abbildung 24 zeigt den Vergleich des Kurzschlussstromes der Elektrolyten, welcher zu den bestimmten Zeiten gemessen wurde. Die Rangliste (Tabelle 6) ordnet die verschiedenen Elektrolyten nach höchstem gemessenen Kurzschlussstrom nach 2 bzw. 10 bzw. 60 Minuten.

Tabelle 6 Rangliste der Elektrolyten nach höchstem Kurzschlussstrom, gemessen nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Elektrolyten, welche dasselbe Redoxpaar enthalten, wurden gleich eingefärbt.

Kurzschlussstrom nach 2 min	Kurzschlussstrom nach 10 min	Kurzschlussstrom nach 60 min
Elektrolyt E1	Elektrolyt E1	Elektrolyt E1
Elektrolyt E6	Elektrolyt E6	Elektrolyt E2
Elektrolyt E4	Elektrolyt E4	Elektrolyt E6
Elektrolyt E2	Elektrolyt E2	Elektrolyt E5
Elektrolyt E5	Elektrolyt E5	Elektrolyt E4
Elektrolyt E3	Elektrolyt E3	Elektrolyt E3

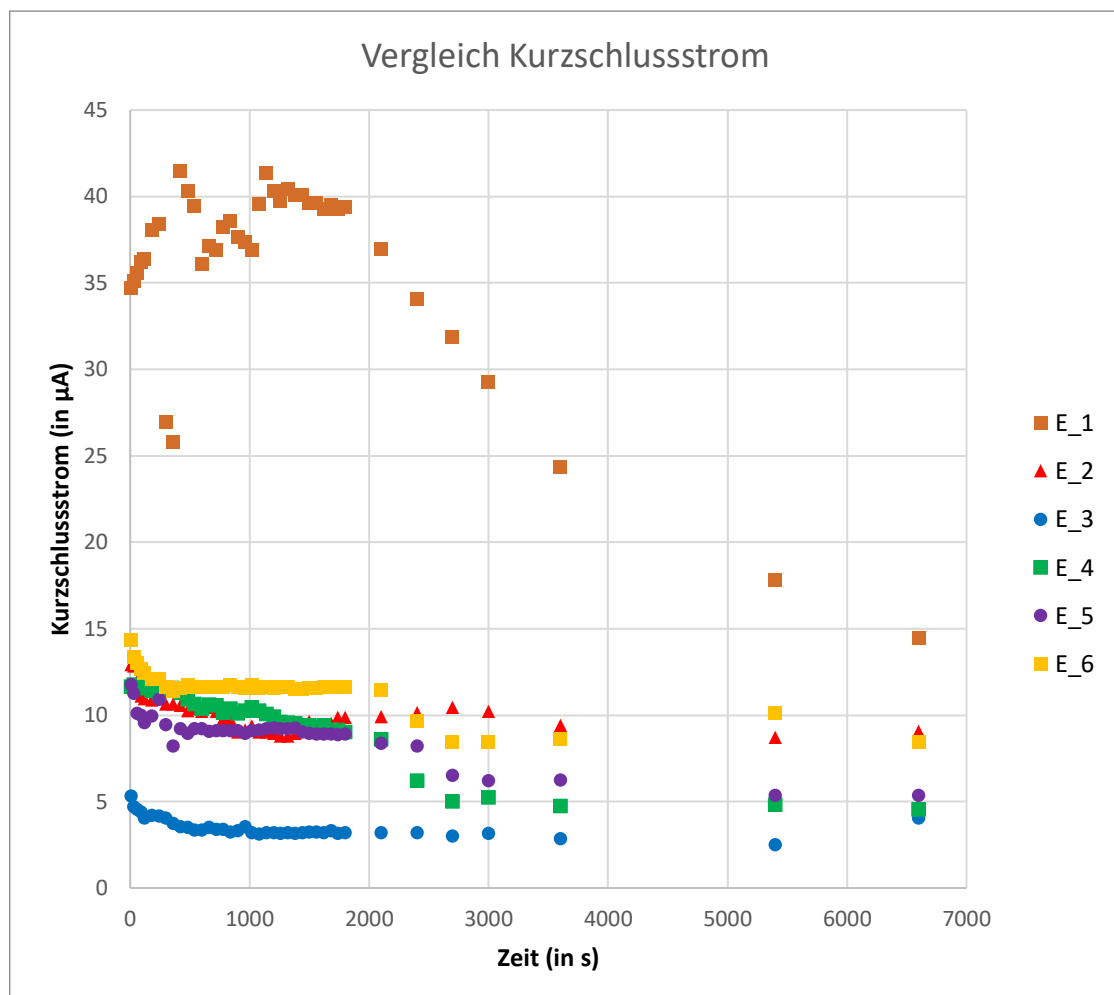


Abbildung 16 Vergleich des Kurzschlussstromes der Elektrolyten nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Elektrolyt E3 zeigt den tiefsten Kurzschlussstrom über den gemessenen Zeitraum und E1 den höchsten.

4.3.2 Leerlaufspannung

Analog zum Vergleich des Kurzschlussstromes, wurde für den Vergleich der Leerlaufspannung jeweils der Durchschnitt der erreichten Leerlaufspannung verwendet. Dieser ist auf Abbildung 25 ersichtlich, die Rangliste auf Tabelle 7.

Tabelle 7 Rangliste der Elektrolyten nach höchster Leerlaufspannung nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Elektrolyten, welche dasselbe Redoxpaar enthalten, wurden gleich eingefärbt.

Leerlaufspannung nach 2 min	Leerlaufspannung nach 10 min	Leerlaufspannung nach 60 min
Elektrolyt E1	Elektrolyt E1	Elektrolyt E2
Elektrolyt E2	Elektrolyt E2	Elektrolyt E1
Elektrolyt E5	Elektrolyt E5	Elektrolyt E5
Elektrolyt E4	Elektrolyt E4	Elektrolyt E3
Elektrolyt E6	Elektrolyt E3	Elektrolyt E6
Elektrolyt E3	Elektrolyt E6	Elektrolyt E4

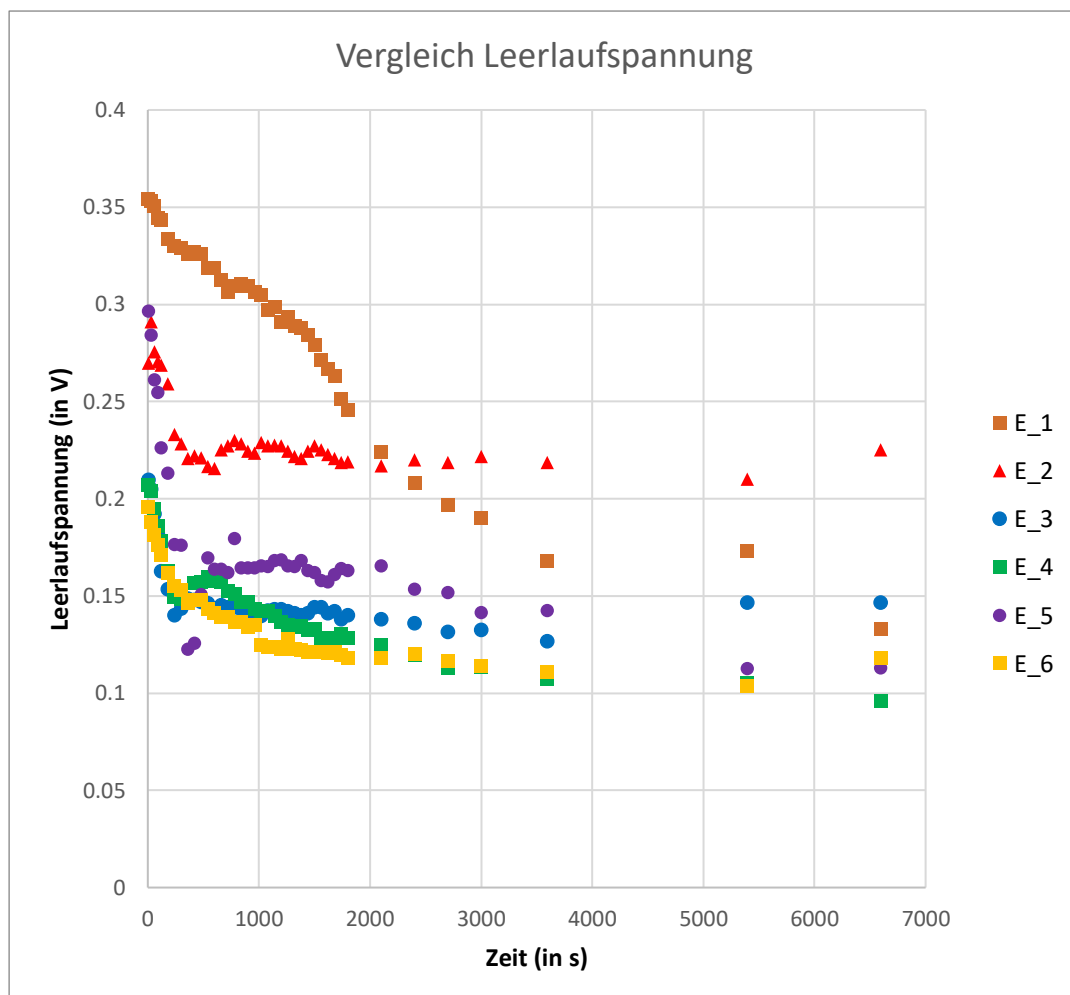


Abbildung 17 Vergleich der Leerlaufspannung der Elektrolyten nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Elektrolyt E1 zeigt den stärksten Abfall.

4.3.3 Ideale Leistung

Die ideale Leistung wurde für jede Zelle mit Formel [1] zu allen gemessenen Zeiten berechnet. Für den Vergleich und die Rangliste wurde jeweils der Durchschnitt der beiden Messungen für jeden Elektrolyten verwendet. Der Vergleich ist auf Abbildung 26 dargestellt, die Rangliste in Tabelle 8.

Tabelle 8 Rangliste der Elektrolyten nach höchster idealer Leistung nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Elektrolyten, welche dasselbe Redoxpaar enthalten, wurden gleich eingefärbt.

Ideale Leistung nach 2 min	Ideale Leistung nach 10 min	Ideale Leistung nach 60 min
Elektrolyt E1	Elektrolyt E1	Elektrolyt E1
Elektrolyt E2	Elektrolyt E2	Elektrolyt E2
Elektrolyt E5	Elektrolyt E6	Elektrolyt E6
Elektrolyt E6	Elektrolyt E4	Elektrolyt E5
Elektrolyt E4	Elektrolyt E5	Elektrolyt E4
Elektrolyt E3	Elektrolyt E3	Elektrolyt E3

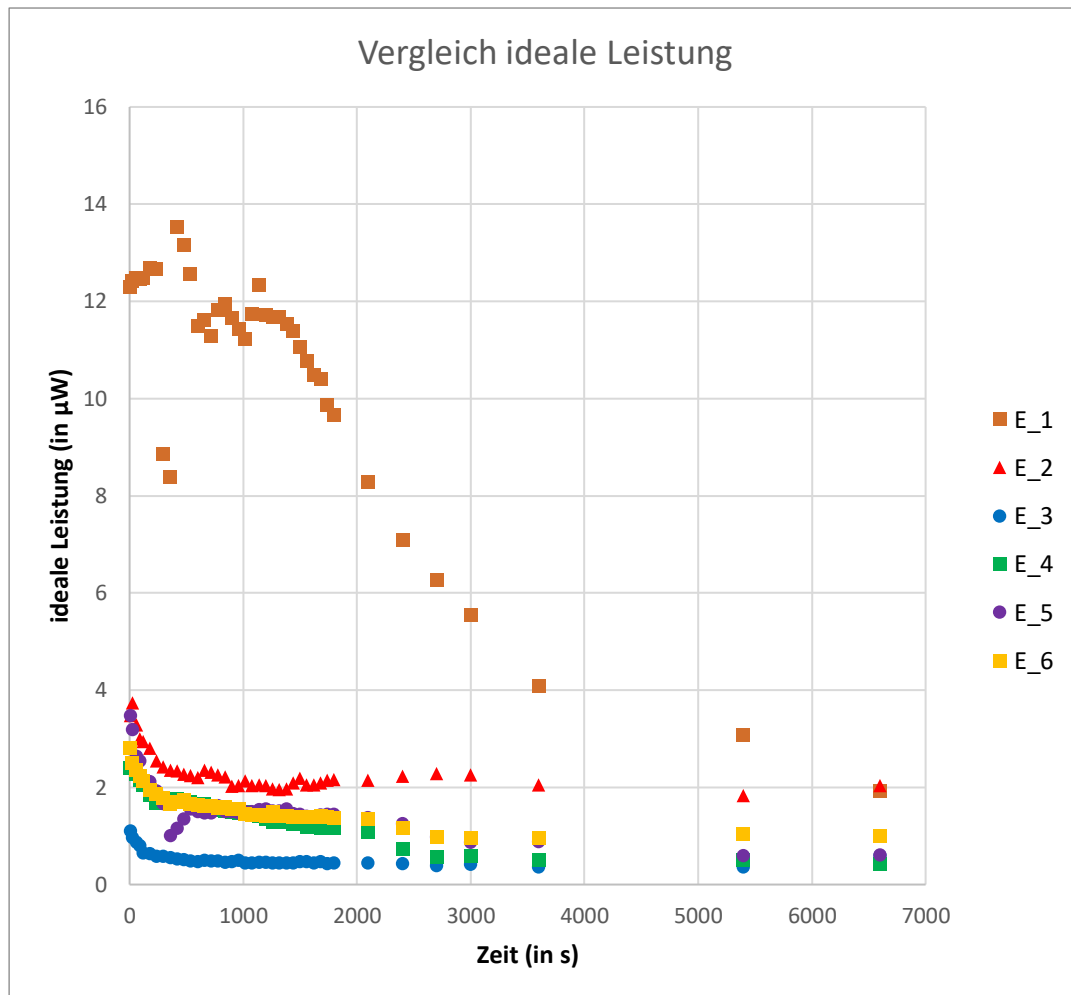


Abbildung 18 Vergleich der idealen Leistung der Elektrolyten nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Die ideale Leistung wird als Produkt aus Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung berechnet.

4.4 Vergleich mit einem herkömmlichen Elektrolyten

Abbildungen 27 und 28 zeigen die Resultate der Messung der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstromes des herkömmlichen Elektrolyten. Bei diesem Elektrolyten ist eine klare Verbesserung des Kurzschlussstromes zu beobachten. Tendenziell nimmt die Leistung der Zellen über die gemessene Zeit zu. Die Kurve des Kurzschlussstromes zeigt nach 35 Minuten eine Stabilisation. Die Kurve der Leerlaufspannung nimmt zu Beginn leicht ab und stabilisiert sich nach ca. 35 Minuten.

Solch ein Verhalten und solche hohen elektrischen Eigenschaften wurden bei keinem selbst hergestellten Elektrolyten beobachtet.

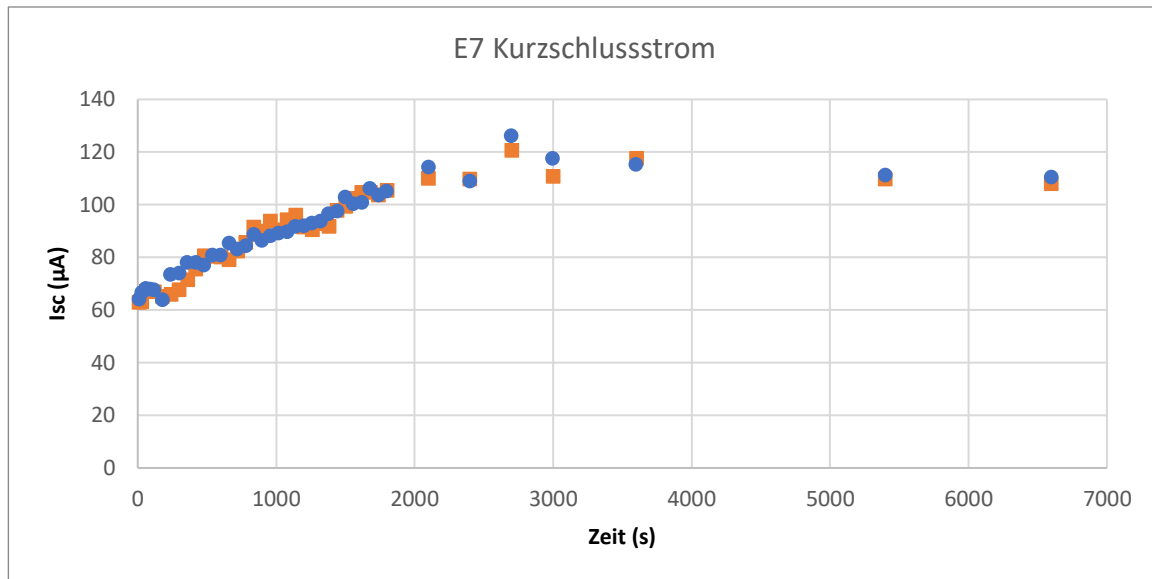


Abbildung 27 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den herkömmlichen Elektrolyten E7. Messung E7_1 (orange) und Messung E7_2 (blau).

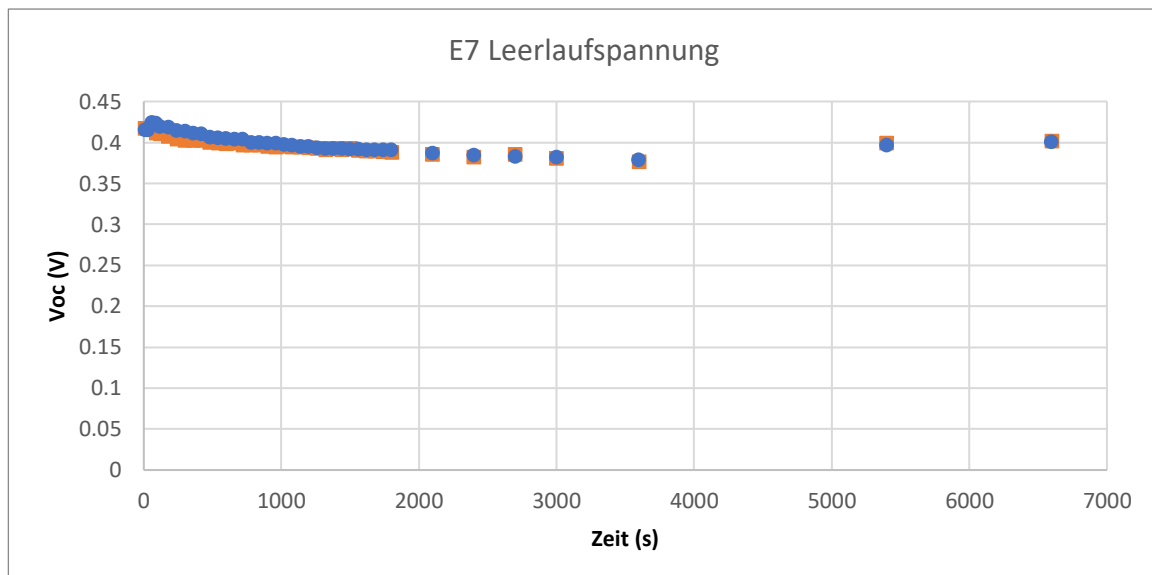


Abbildung 28 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den herkömmlichen Elektrolyten E7. Messung E7_1 (orange) und Messung E7_2 (blau).

4.5 Interpretation der Vergleiche

Alle Ranglisten zeigen klar, dass sich der Elektrolyt E1, bezüglich der selbst hergestellten Elektrolyten, mit Redoxmediator I_2/I_3^- als der effizienteste erwiesen hat. Es ist jedoch ein starker Verlust der idealen Leistung über den gemessenen Zeitraum zu erkennen. Ein Grund dafür könnte die Sublimation von Iod sein. Es ist vorstellbar, dass das Iod zuerst ausfällt und wegen der Erwärmung sublimiert und entflieht, was die Konzentration des Redoxpaares im Elektrolyten verringert. Dies führt zu einem verschlechterten Ladungstransport. Auch ist denkbar, dass ein Verlust von Iod durch andere Nebenreaktionen verursacht wurde.

Die Vergleiche der Elektrolyten zeigen zudem ein grosses Mittelfeld. Dabei zeigt Elektrolyt E2 die grösste Leistung über den gemessenen Zeitraum. Elektrolyt E2, Elektrolyt E6 und Elektrolyt E3 enthalten alle dasselbe Redoxpaar. Ausserdem enthalten alle drei Elektrolyten das Gegenion Sulfat und weisen keine grossen Unterschiede ihrer Absorption im solaren Spektrum auf. Die Erklärung der unterschiedlichen idealen Leistungen muss folglich über das zweite Gegenion erfolgen. Dabei ist klar erkennbar, dass Elektrolyt E3 im Vergleich zu allen anderen Elektrolyten die tiefste ideale Leistung aufweist. Elektrolyt E3 enthält Chlorid als Gegen-Ion. Möglicherweise könnte dieses der Grund für die tiefe ideale Leistung sein. Nach dieser Argumentation eignet sich somit Nitrat, welches in Elektrolyt E2 enthalten ist, am besten als Gegen-Ion.

Bei der Herstellung des Elektrolyten E4 reagierte Eisen(III)-chlorid mit Ammonium-thiocyanat zu Eisen(III)-thiocyanat. Diese Reaktion führt zu einem Gleichgewicht, welches zu einem gewissen Grad Einfluss auf die weiteren Reaktionen im Elektrolyten hat. Auch enthält der Elektrolyt Chlorid, welches, wie eben erwähnt, einen vermutlich negativen Einfluss auf die ideale Leistung des Elektrolyten hat.

Die ideale Leistung aller Elektrolyte nimmt, vor allem am Anfang der Messung, stark ab. Dies liegt hauptsächlich an der Leerlaufspannung, welche bei zunehmender Temperatur abnimmt. Die ideale Leistung wird nach Formel [1] berechnet und hängt somit linear von der Leerlaufspannung ab. Die Leerlaufspannung ist, wie bereits erwähnt, stark temperaturabhängig. Trotz einer Raumtemperatur, die konstant zwischen 27°C und 28°C gehalten wurde, wird bei Betrachtung der Messergebnisse eine Erwärmung des Elektrolyten vermutet.



Abbildung 19 Farbe der Elektrolyten. Man erkennt klar, dass Elektrolyten E4, E1 und E7 die grössten Absorptionen im solaren Spektrum aufweist.

5 Diskussion

5.1 Fragestellungen

Das Ziel dieser Arbeit war es, alternative Redoxpaare zum gängigen I_2/I_3^- -System zu finden und diese zu beurteilen. Dabei sollte auf verschiedene Aspekte der Elektrolyten Rücksicht genommen werden. Ausserdem ging es darum zu verstehen, wie die Grätzel-Zelle funktioniert und was ihre wirtschaftliche Bedeutung ist.

5.1.1 Funktion und wirtschaftliche Bedeutung der Grätzel-Zelle

Die Funktion und die wirtschaftliche Bedeutung der Grätzel-Zelle wurde bereits unter Grundlagen ausführlich beschrieben. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Grätzel-Zelle auf dem Prinzip der Photosynthese basiert. Ihre Herstellung ist deutlich einfacher, kostengünstiger und benötigt weniger Energie, als die Herstellung einer Silizium-Solarzelle. In Labors konnten bereits Wirkungsgrade von 10-12% erreicht werden. Aufgrund des niedrigen Wirkungsgrades und der kurzen Lebensdauer wird eine kommerzielle Nutzung der Grätzel-Zelle bisher allerdings nicht als sinnvoll angesehen, weshalb die Grätzel-Zelle momentan keine grosse wirtschaftliche Bedeutung hat. Im Hinblick auf die klimatischen Veränderungen ist es wichtig, dass mehr Energie in die Forschung von alternativer und erneuerbarer Stromproduktion gesteckt wird. Die Grätzel-Zelle bietet nicht zuletzt auch eine ästhetische Alternative zu anderen Solarzellen, was sie besonders attraktiv in der Architektur macht. Aus diesem Grund ist es wünschenswert, dass die Grätzel-Zelle eine grössere wirtschaftliche Bedeutung erreichen könnte.

5.1.2 Welche Redoxpaare eignen sich als Alternativen zum gängigen Elektrolytsystem

Grundsätzlich konnte für alle Grätzel-Zellen eine ideale Leistung bestimmt werden, weshalb diese auch verglichen werden können. Aus den Versuchen geht hervor, dass die Elektrolyten mit dem Redoxpaar I_2/I_3^- die höchsten elektrischen Leistungen erzielen konnten. Dieses Redoxpaar ist, wie bereits erwähnt, das herkömmliche Redoxpaar für Elektrolyten. Trotzdem konnte für den selbst hergestellten Elektrolyten E1 ein starker Abfall der idealen Leistungen über die gemessene Zeit beobachtet werden. Mithilfe eines anderen Lösungsmittels oder eine Abdichtung könnte das Verdampfen oder Sublimieren der Stoffe verhindert werden. Dies ist eine weiterführende Frage, die im Rahmen einer weiteren Arbeit behandelt werden kann. Es muss zudem beachtet werden, dass eine an den Elektrolyten gestellte Anforderung eine geringe Toxizität ist. Iod wurde von der EU als Gefahrenstoff klassifiziert. Die Freisetzung von Iod in die Umwelt sollte somit vermieden werden.^[16] Dieser Elektrolyt kann somit als einen, wegen seiner elektrischen Eigenschaften, geeigneten Elektrolyten beurteilt werden. Die höhere Toxizität des Iods ist jedoch ein Faktor, der durchaus gegen den Elektrolyten und damit für die Suche nach einer Alternative zu diesem gängigen Elektrolytsystem spricht.

Die drei Elektrolyten E2, E3 und E6, welche alle auf dem Redoxpaar Fe^{2+}/Fe^{3+} basierten, zeigten relativ unterschiedliche Werte für die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom. Es ist jedoch bei allen Grätzel-Zellen dieser Elektrolyte ein Einbruch in die Leerlaufspannung bei 7 Minuten zu erkennen. Es wird hier vermutet, dass dies Ausdruck eines hier benannten «Equilibrations-Effektes» ist. Allgemein ist vor allem zu Beginn der Messung ein starker Abfall

zu erkennen, was auch auf einen «Equilibations-Effekt» zurück zu schliessen ist. Der Vergleich dieser drei Elektrolyten diene vor allem dem Vergleich der Gegen-Ionen, da dies der primäre Unterschied dieser Elektrolyten ist. Dabei hat sich in den Versuchen gezeigt, dass Chlorid als Gegen-Ion am ungeeignetsten ist. Dies wird auch durch die Resultate des Elektrolyten E4 unterstützt, da dieser ebenso Chlorid enthält und wie auch Elektrolyt E3 tiefe elektrische Eigenschaften zeigte. Es geht ausserdem aus den Versuchen hervor, dass sich Nitrat als geeignetstes Gegen-Ion erwiesen hat.

Möglicherweise könnte das Redoxpaar $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ durch Anpassungen und Verbesserungen, wie zum Beispiel die Verwendung eines anderen Lösungsmittels, eine Alternative zum gängigen Redoxsystem darstellen. Es müssten zudem allfällige Wechselwirkungen zwischen Redoxpaar und Lösungsmittel beachtet werden. Alle drei Elektrolyten wiesen ausserdem einen im Vergleich zum effizientesten Elektrolyten E1, stabilen Verlauf auf. Dies ist eine positive Eigenschaft, welche wichtig für die reale Verwendung des Elektrolyten ist.

Wie bereits erwähnt, enthält auch der Elektrolyt E4 Chlorid-Ionen. Auch dieser Elektrolyt schnitt im Versuch schlecht ab, was die Vermutung über den negativen Einfluss von Chlorid-Ionen auf den Elektrolyten weiter erhärtet.

Auf Abbildung 29 können die Farben der Elektrolyten erkannt werden. Wie in der Theorie beschrieben, wirkt sich eine geringe Absorption im solaren Spektrum positiv auf die elektrischen Eigenschaften des Elektrolyten aus. Elektrolyt E1 und Elektrolyt E4 zeigen mit dem herkömmlichen Elektrolyten ganz klar die grössten Absorptionen im solaren Spektrum. Während Elektrolyt E1 in den Messungen eine im Vergleich sehr grosse ideale Leistung aufweist, weist Elektrolyt E4 eine eher tiefe ideale Leistung auf. Aus diesem Grund kann hier ohne weitere Versuche nicht von einer klaren Abhängigkeit zwischen der idealen Leistung der getesteten Elektrolyten und der Absorption im solaren Spektrum ausgehen. Trotzdem stellt die Absorption im solaren Spektrum eine mögliche Erklärung für die, im Vergleich, tiefe ideale Leistung des Elektrolyten E4 dar. Da Elektrolyt E1 eine verhältnismässig grosse Absorption aufweist, kann ausserdem vermutet werden, dass diese Anforderung an den Elektrolyten eine den anderen Anforderungen untergeordnete Rolle spielt.

Elektrolyt E4 diene in dieser Arbeit zur Beurteilung der Anforderung zur geringen Absorption im solaren Spektrum und zur Überprüfung der Vermutung des negativen Einflusses von Chlorid-Ionen auf den Elektrolyten. Aus dieser Arbeit geht jedoch hervor, dass Elektrolyt E4 kein grosses Potential als Alternative zum gängigen Elektrolytensystem hat.

Auch die Grätzel-Zellen mit dem Elektrolyt E5 zeigten, wie in den Vergleichen zu erkennen ist, schlechte elektrische Eigenschaften. Ausserdem zeigt dieser Elektrolyt den stärksten «Equilibations-Effekt» nach 7 Minuten. In Elektrolyt E5 sind ausserdem Bromverbindungen enthalten. Elementares Brom ist hochgiftig und stark ätzend. Bei Hautkontakt führt es zu schwer heilenden Verätzungen. Inhalierte Bromdämpfe führen nach einer Latenzzeit zu Atemnot, Lungenentzündungen und Lungenödem. Auch auf Wasserorganismen wirkt Brom giftig.^[17] Neben den tiefen elektrischen Eigenschaften, die dieser Elektrolyt aufwies, ist die Toxizität ein weiteres Argument gegen die Verwendung eines auf dem Redoxpaar $\text{Br}^-/\text{Br}_3^-$ basierenden Elektrolyten.

Im Vergleich mit dem herkömmlichen Elektrolyten hat sich dieser als der effizienteste Elektrolyt erwiesen. Er zeigt, im Gegensatz zu den anderen Elektrolyten eine tendenzielle Verbesserung seiner elektrischen Eigenschaften über die gemessene Zeit. Es muss jedoch

bedacht werden, dass über den herkömmlichen Elektrolyten nur das verwendete Redoxpaar bekannt ist. Es kann weder eine Aussage über das Lösungsmittel noch über andere enthaltene Stoffe gemacht werden.

Natürlich können diese Resultate nicht zeigen, wie diese Grätzel-Zellen unter realen Bedingungen funktionieren. Auch müsste für jede Zelle ihr Füllfaktor bestimmt werden, um Aussagen über die maximale Leistung zu machen. Dies wäre sehr zeitintensiv und konnte deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht gemacht werden.

5.2 Schlussfolgerung und Ausblick

Über die Erkenntnisse dieser Arbeit kann zusammenfassend gesagt werden, dass sich die Elektrolyten, welche auf dem Redoxpaar I_2/I_3^- basieren als die Effizientesten erwiesen haben. Durch die Toxizität von Iod wäre jedoch eine Alternative wünschenswert. Diese Alternative könnte das Redoxpaar Fe^{2+}/Fe^{3+} bringen, da die Zellen, welche dieses Redoxpaar enthielten, relativ stabile elektrische Werte aufzeigten. Diese Elektrolyten müssten in einem weiteren Versuch perfektioniert werden, da sie nur einen Bruchteil der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstromes der I_2/I_3^- -Elektrolyten erreichen konnten. Trotz allem, konnten die selbst hergestellten Elektrolyten die elektrischen Werte des herkömmlichen Elektrolyten nicht erreichen.

Vermutlich haben alle selbst hergestellten Elektrolyten negativ auf den Einfluss höherer Temperaturen reagiert. Auch dieses Problem könnte mithilfe weiterer Experimente angegangen werden. Die Versuche haben zudem gezeigt, dass sich Chlor-Ionen im Elektrolyten negativ auf dessen elektrische Eigenschaften auswirken. In einer weiteren Arbeit wäre es interessant zu untersuchen weshalb dies so ist. Auch wäre es interessant, herauszufinden, ob es möglich ist, dass gelöstes Iod im Elektrolyten teilweise ausfällt, sublimiert und so entflieht oder ob die Ursache für die starke Abnahme durch Nebenreaktionen entsteht. Zudem wäre es spannend, Gründe für den erwähnten «Equilibrations-Effekt» zu suchen und zu prüfen, ob dieser einen Zusammenhang mit der Redoxreaktion im Elektrolyten hat.

5.3 Reflexion

Den Arbeitsprozess konnte ich mir sehr gut einteilen, weshalb ich keinen Druck beim Durchführen der Experimente hatte. Dies hat sich positiv gezeigt. Ich hatte genug Zeit, die Diagramme passend darzustellen und sie zu interpretieren. Insgesamt habe ich durch diese Arbeit viel gelernt und mein Wissen, besonders in der Photovoltaik, vertieft. Schade finde ich, dass es mir nicht möglich war Strom-Spannungs-Kennlinien aufzunehmen, da dies meiner Meinung nach, ein spannender Zusatz zur Arbeit gewesen wäre. Auch schade war, dass es mir wegen der COVID19-Krise nicht möglich war, in einem Labor zu arbeiten. Zudem werde ich bei meiner nächsten Arbeit darauf achten, dass ich meinen Arbeitsprozess präziser dokumentiere. Am meisten Spass hat mir die Arbeit im Labor und das Zusammenbauen der Zellen gemacht. Weniger lustig waren die Messungen, da diese pro Zelle 2 Stunden Zeit einnahmen und ich während der ganzen Messung konzentriert sein musste. Insgesamt, bin ich überaus zufrieden mit meinen Erkenntnissen der gesamten Arbeit.

6 Abkürzungsverzeichnis

S	Farbstoff in reduzierter Form
S ⁺	Farbstoff in oxidiert Form
S*	Farbstoff im angeregten Zustand
$h\nu$	Energie in Form von Licht; Photon
OX	Oxidationsmittel
RE	Reduktionsmittel
e ⁻	Elektron
e(TiO ₂)	in TiO ₂ -Schicht injiziertes Elektron
V _{oc}	Leerlaufspannung
I _{sc}	Kurzschlussstrom
MPP	Punkt maximaler Leistung
V _{max}	Spannung beim MPP
I _{max}	Strom beim MPP
P_{ideal}	Ideale Leistung
FF	Füllfaktor
P_{max}	Elektrische Leistung am MPP
P_{in}	Eingestrahlte Sonnenenergie
η	Wirkungsgrad
E1_1	Testzelle 1 des Elektrolyten E1
E1_2	Testzelle 2 des Elektrolyten E1

7 Literaturverzeichnis

[1] Arnold, Julian (2017): Grätzel-Zelle. Einfluss des Elektrolyten auf die elektrischen Eigenschaften einer Grätzel-Zelle. Maturitätsarbeit, Kantonsschule Seetal, (Hochdorf).

[2] Paschotta, Rüdiger (2010): Solarzelle. <https://www.energie-lexikon.info/solarzelle.html>, (Stand: 14.03.2020, Zugriff: 30.11.2020)

[3] Science-Blog: Michael Grätzel. <http://www.science-blog.at/Autor/Michael+Grätzel>, (Zugriff: 16.10.2020)

[4] O'Reagan, Brien; Grätzel, Michael (1991): A low cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂-films. Nature, Nr. 353, 24.10.1991, o.O., S. 737-740.

[5] Diekmann, Bernd (2014): Energie. Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung. 3. Auflage, Wiesbaden: Springer-Verlag. (S. 61 bis 63)

[6] Eigensonne (o.J.): Grätzelzelle – Die Alternative zur Solarzelle auf Silizium-Basis. <https://www.eigensonne.de/graetzelzelle/>, (Zugriff: 16.10.2020)

[7] Lang-Koetz, Claus; et al. (2009): Schlussbericht des Forschungsprojekts Color Sol® - Nachhaltige Produktinnovationen durch Farbstoffsolarzellen. Bericht, (Stuttgart).

[8] Paschotta, Rüdiger (2010): Solarmodul. <https://www.energie-lexikon.info/solarmodul.html>, (Stand 14.08.2020; Zugriff: 15.10.2020)

[9] o.A. (o.J.): 2 Aufbau und Funktion der Farbstoffsolarzelle. <http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/diss/2003/fu-berlin/2003/2/Kap2.pdf>, (Zugriff: 16.10.2020)

[10] Yu, Ze (2012): Liquid Redox Electrolytes for Dye-Sensitized Solar Cells. Doktorarbeit, KTH Chemical Science and Engineering, (Stockholm).

[11] Wellmann, Peter (2019): Materialien der Elektronik und Energietechnik. Halbleiter, Graphen, Funktionale Materialien. 2. Auflage, Wiesbaden: Springer-Verlag. (S.101)

[12] o.A. (o.J.): 7 Photovoltaik. <https://www.uni-kassel.de/eecs/fileadmin/datas/fb16/Fachgebiete/FSG/Download/Lehre/ETP1/Photovoltaik.pdf>, (Zugriff: 12.10.2020)

[13] Finger, Lars Hendrick (2016): Funktionale Organische Salze mit Chalkogenolat-, Carboxylat- und Azetolat-Antionen. Auf der Suche nach neuen Elektrolytmaterialien für Energie-Speicherung und -Konversion. Doktorarbeit, Philips-Universität Marburg (Marburg). (S. 6)

[14] o.A. (2009): Showexperimente. Künstliches Blut. <https://www.chemie.de/experimente/kuenstliches-blut.html>, (Zugriff: 3.12.2020)

[15] Wu, Jihuai; et al. (2015): Electrolytes in Dye-Sensitized Solar Cells. Chemical Reviews, Nr. 115, 28.1.2015, China, S. 2136-2173.

[16] chemie.de (o.J.): Iod. <https://www.chemie.de/lexikon/Iod.html>, (Zugriff: 18.10.2020)

[17] chemie.de (o.J.): Brom. <https://www.chemie.de/lexikon/Brom.html>, (Zugriff: 18.10.2020)

[18] chemie.de (o.J.): Kaliumiodid; Kaliumbromid; Eisen(II)-sulfat; Eisenchlorid; Ammoniumthiocyanat. <https://www.chemie.de>, (Zugriff: 18.10.2020)

[19] Wikipedia (o.J.): Eisen(III)-bromid; Eisen(III)-sulfat; Eisen(III)-nitrat; Eisenthiocyanat. <https://www.wikipedia.org>, (Zugriff: 18.10.2020)

[20] o.A. (o.J.): Siedepunkt von Wasser. <https://rechneronline.de/barometer/siedepunkt.php>, (Zugriff: 18.10.2020)

[21] Frei, Alfons; et al. (2017): Fundamantum Mathematik und Physik. Formeln, Begriffe, Tabellen für die Sekundarstufen I und II. 9. Auflage, Zürich: Orell Füssli. (S. 101-102)

[²²] Wenger Engineering GmbH (o.J.): Wasser. <https://stoffdaten-online.de/fluide/wasser/>,
(Zugriff: 18.10.2020)

[²³] Wenger Engineering GmbH (o.J.): Ethanol. <https://stoffdaten-online.de/fluide/ethanol/>,
(Zugriff: 18.10.2020)

Grundlagen in den Fächern Chemie und Physik wurden im Chemieunterricht bei Natalie Streiff und im Physikunterricht bei Patrick Spengler erworben.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Der Erfinder der Grätzel-Zelle Michael Grätzel vor dem SwissTech Convention Center in Lausanne. Das Gebäude nutzt Grätzel-Zellen zur Stromerzeugung. Quelle: Di Domenico, Valerio: Fotosynthese als Vorbild. https://www.handelszeitung.ch/panorama/fotosynthese-als-vorbild , (Zugriff: 6.12.2020)	2
Abbildung 2 Vorgänge in der Grätzel-Zelle. Die schwarzen Pfeile 1,2,3,4 sind die oben beschriebenen Vorgänge. Die roten Pfeile a,b,c sind die beschriebenen Verlustmechanismen. Quelle: o.A. (o.J.): 2 Aufbau und Funktion der Farbstoffsolarzelle. http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/diss/2003/fu-berlin/2003/2/Kap2.pdf , (Zugriff: 16.10.2020).....	6
Abbildung 3 Schematische Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle mit der maximal erreichbaren Leistung P_{max} . Sie vereint die Kennwerte in einer Grafik. Quelle: Finger, Lars Hendrick (2016): Funktionale Organische Salze mit Chalkogenolat-, Carboxylat- und Azetolat Antionen. Auf der Suche nach neuen Elektrolytmaterialien für Energie-Speicherung und -Konversion. Doktorarbeit, Philips-Universität Marburg. S.6. 7	
Abbildung 4 Abhängigkeit der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstromes von der Einstrahlung. Es ist eine lineare Abhängigkeit des Stromes von der Bestrahlung zu erkennen. Quelle: Diekmann, Bernd (2014): Energie. Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung. 3. Auflage, Wiesbaden: Springer-Verlag. (S. 61 bis 63).....	8
Abbildung 5 Abhängigkeit der Leerlaufspannung, des Kurzschlussstromes und der Leistung von der Temperatur. Es ist klar ersichtlich, dass eine erhöhte Temperatur zu einer tieferen Spannung führt. Der Strom nimmt hingegen mit steigender Temperatur geringfügig zu. Die unteren Kurven zeigen wie sich die Leistung bei den verschiedenen Temperaturen verändert. Wie zu erkennen ist, nimmt die Leistung bei steigender Temperatur ab. Quelle: Waffenschmidt, Eberhard (2006): Wenn es Solarzellen zu heiss wird, liefern sie weniger Energie. https://www.sfv.de/lokal/mails/wvf/wenn_es_ , (Zugriff: 18.10.2020).....	9
Abbildung 6 Der Kurzschlussstrom der 1. Grätzel-Zelle wird mithilfe eines Multimeters gemessen. Quelle: vom Autor	13
Abbildung 7 Zur Herstellung des Elektrolyten E4 wird mithilfe des Magnetrührkernes Eisen(III)-chlorid in Ethanol gelöst. Quelle: vom Autor.	15
Abbildung 8 Für die Herstellung der Gegenelektroden werden FTO-Glasplatten mithilfe eines Bleistiftes mit Graphit beschichtet. Quelle: vom Autor	16
Abbildung 9 Die mit Titanoxid beschichteten FTO-Platten werden zum Trocknen auf ein Papiertuch gelegt. Quelle: vom Autor	16
Abbildung 10 Der Messaufbau. Durch eine leichte Erhöhung wurde die Lichtquelle direkt auf die Zellen gerichtet. Mit dem Multimeter wurden Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung gemessen und mit Excel dokumentiert. Mithilfe des elektronischen Thermometers wurde die Temperatur überwacht. Quelle: vom Autor	17
Abbildung 11 Der Messaufbau mit einer Testzelle nach 30 Minuten Messung. Mithilfe eines Klebebandes wurden die Zellen fixiert. Link, ist der Thermometer zu sehen. Quelle: vom Autor.....	17
Abbildung 12 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E1. Messung E1_1 (orange) und Messung E1_2 (blau). Quelle: vom Autor	20
Abbildung 13 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E1. Messung E1_1 (orange) und Messung E1_2 (blau). Quelle: vom Autor	21

Abbildung 14 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E2. Messung E2_1 (orange) und Messung E2_2 (blau). Quelle: vom Autor	22
Abbildung 15 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E2. Messung E2_1 (orange) und Messung E2_2 (blau). Quelle: vom Autor	23
Abbildung 16 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E3. Messung E3_1 (orange) und Messung E3_2 (blau). Quelle: vom Autor	23
Abbildung 17 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E3. Messung E3_1 (orange) und Messung E3_2 (blau). Quelle: vom Autor	23
Abbildung 18 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E6. Messung E6_1 (orange) und Messung E6_2 (blau). Quelle: vom Autor	24
Abbildung 19 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E6. Messung E6_1 (orange) und Messung E6_2 (blau). Quelle: vom Autor	24
Abbildung 20 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E4. Messung E4_1 (orange) und Messung E4_2 (blau). Quelle: vom Autor	25
Abbildung 21 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E4. Messung E4_1 (orange) und Messung E4_2 (blau). Quelle: vom Autor	25
Abbildung 22 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den Elektrolyten E5. Messung E5_1 (orange) und Messung E5_2 (blau). Quelle: vom Autor	26
Abbildung 23 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den Elektrolyten E5. Messung E5_1 (orange) und Messung E5_2 (blau). Quelle: vom Autor	26
Abbildung 24 Vergleich des Kurzschlussstromes der Elektrolyten nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Elektrolyt E3 zeigt den tiefsten Kurzschlussstrom über den gemessenen Zeitraum und E1 den höchsten. Quelle: vom Autor	28
Abbildung 25 Vergleich der Leerlaufspannung der Elektrolyten nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Elektrolyt E1 zeigt den stärksten Abfall. Quelle: vom Autor	29
Abbildung 26 Vergleich der idealen Leistung der Elektrolyten nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Die ideale Leistung wird als Produkt aus Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung berechnet. Quelle: vom Autor	30
Abbildung 27 Darstellung der Messresultate des Kurzschlussstromes für den herkömmlichen Elektrolyten E7. Messung E7_1 (orange) und Messung E7_2 (blau). Quelle: vom Autor	31
Abbildung 28 Darstellung der Messresultate der Leerlaufspannung für den herkömmlichen Elektrolyten E7. Messung E7_1 (orange) und Messung E7_2 (blau). Quelle: vom Autor	31
Abbildung 29 Farbe der Elektrolyten. Man erkennt klar, dass Elektrolyten E4, E1 und E7 die grössten Absorptionen im solaren Spektrum aufweist. Quelle: vom Autor	32

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich der Wirkungsgrade von verschiedenen Solarzellen. Die Grätzel-Zelle hat einen, vergleichsweise niedrigen industriellen Wirkungsgrad. Quelle: Diekmann, Bernd (2014): Energie. Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung. 3. Auflage, Wiesbaden: Springer-Verlag. S. 63.....	3
Tabelle 2 Messprotokoll für die beiden Elektrolyten des Vorexperimentes. Quelle: vom Autor.....	13
Tabelle 3 Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom der verschiedenen Zellen, gemessen nach 2 bzw. 10 Minuten. Quelle: vom Autor.....	18
Tabelle 4 Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom, gemessen nach 60 Minuten. Quelle: vom Autor.....	19
Tabelle 5 ideale Leistung nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten auf 3 Kommastellen gerundet Quelle: vom Autor.....	19
Tabelle 6 Rangliste der Elektrolyten nach höchstem Kurzschlussstrom, gemessen nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Elektrolyten, welche dasselbe Redoxpaar enthalten, wurden gleich eingefärbt. Quelle: vom Autor.....	28
Tabelle 7 Rangliste der Elektrolyten nach höchster Leerlaufspannung nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Elektrolyten, welche dasselbe Redoxpaar enthalten, wurden gleich eingefärbt. Quelle: vom Autor	29
Tabelle 8 Rangliste der Elektrolyten nach höchster idealer Leistung nach 2 Minuten bzw. 10 Minuten bzw. 60 Minuten. Elektrolyten, welche dasselbe Redoxpaar enthalten, wurden gleich eingefärbt. Quelle: vom Autor	30
Tabelle 9 Messtabelle der Zellen E1_1 und E1_2. Quelle: vom Autor.....	46
Tabelle 10 Messtabelle der Zellen E2_1 und E2_2. Quelle: vom Autor.....	47
Tabelle 11 Messtabelle der Zellen E3_1 und E3_2. Quelle: vom Autor.....	48
Tabelle 12 Messtabelle der Zellen E4_1 und E4_2. Quelle: vom Autor.....	49
Tabelle 13 Messtabelle der Zellen E5_1 und E5_2. Quelle: vom Autor.....	50
Tabelle 14 Messtabelle der Zellen E6_1 und E6_2. Quelle: vom Autor.....	51
Tabelle 15 Messtabelle der Zellen E7_1 und E7_2. Quelle: vom Autor.....	52

10 Anhang

10.1 Materialliste

Material zur Herstellung der Elektrolyten

- Bechergläser
- Messkolben
- Magnetrührer
- Rührfisch
- Waage
- 6 Braunflaschen
- Trichter
- Spatel

Reagenzien zur Herstellung der Elektrolyten

- 3.72g Iod
- 1.03g Kaliumiodid
- 2.23g Kaliumbromid
- 1.85g Eisen(III)-bromid
- 2 x 0.95g Eisen(II)-sulfat
- 1.51g Eisen(III)-nitrat
- 1.01g Eisen(III)-chlorid
- 1.90g Eisen(II)-sulfat
- 2.50g Eisen(III)-sulfat
- Eisen(III)-chlorid
- Ammonium-thiocyanat
- Ethanol (96%)
- Destilliertes Wasser

Material zur Herstellung der Grätzel-Zellen

- Getrocknete Hibiskusblüten
- FTO-Platten mit Titanoxid beschichtet
- FTO-Platten unbeschichtet
- Bleistift
- Pipetten
- Magnetrührer
- Klammern
- Papiertuch
- Destilliertes Wasser

Materialien zur Messung

- Lampe
- Multimeter
- Stromkabel
- Ventilator
- Heizkörper
- Temperaturfühler Vernier

10.2 Stoffeigenschaften der verwendeten Stoffe und Lösungsmittel

10.2.1 Molare Masse Feststoffe

Iod	253.81 g/mol ^[16]
Kaliumiodid	166.00 g/mol ^[18]
Kaliumbromid	119.01 g/mol ^[18]
Eisen(III)-bromid	295.56 g/mol ^[19]
Eisen(II)-sulfat	151.91 g/mol ^[18]
Eisen(III)-sulfat	399.88 g/mol ^[19]
Eisen(III)-nitrat	241.86 g/mol ^[19]
Eisenchlorid	162.21 g/mol ^[18]
Ammoniumthiocyanat	76,122 g/mol ^[18]
Eisen-thiocyanat	230.09 g/mol ^[19]

10.2.2 Eigenschaften Lösungsmittel

Wasser	Siedepunkt:	97.95 °C ^[20]
	Schmelzpunkt:	0 °C ^[21]
	Dichte:	998 kg/m ³ ^[21]
	Viskosität:	0.0010012 Pa s ^[22]
Ethanol (96%)	Siedepunkt:	78.33 °C ^[21]
	Schmelzpunkt:	-114. °C ^[21]
	Dichte:	789 kg/m ³ ^[21]
	Viskosität (bei 20°C):	0.0011938 Pa s ^[23]

10.3 Messtabellen

10.3.1 Elektrolyt E1

Tabelle 9 Messtabelle der Zellen E1_1 und E1_2.

Zelle E1_1			Zelle E1_2		
t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)	t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)
10	0.356	34.9	10	0.352	34.5
30	0.355	34.6	30	0.351	35.7
60	0.351	34.8	60	0.35	36.4
90	0.345	35.8	90	0.343	36.6
120	0.343	36.2	120	0.343	36.6
180	0.337	37.8	180	0.33	38.3
240	0.333	39.6	240	0.327	37.2
300	0.331	25.9	300	0.326	28
360	0.329	21.7	360	0.322	29.9
420	0.326	42.2	420	0.327	40.7
480	0.327	39.4	480	0.325	41.3
540	0.32	39.9	540	0.317	39
600	0.32	38	600	0.317	34.2
660	0.318	37.6	660	0.307	36.7
720	0.308	37.9	720	0.304	35.9
780	0.317	41.4	780	0.302	35
840	0.312	42	840	0.308	35.1
900	0.314	40.6	900	0.305	34.7
960	0.307	40.8	960	0.305	33.9
1020	0.308	39.9	1020	0.301	33.9
1080	0.294	40	1080	0.3	39.1
1140	0.299	38.8	1140	0.298	43.9
1200	0.292	39	1200	0.289	41.7
1260	0.296	37.2	1260	0.291	42.3
1320	0.289	39.1	1320	0.289	41.8
1380	0.293	38.6	1380	0.283	41.5
1440	0.285	38.5	1440	0.283	41.7
1500	0.281	38.6	1500	0.277	40.6
1560	0.27	39.3	1560	0.273	40
1620	0.266	38.8	1620	0.267	39.8
1680	0.262	39	1680	0.264	40
1740	0.254	38.9	1740	0.249	39.6
1800	0.248	39	1800	0.243	39.8
2100	0.226	34.3	2100	0.222	39.7
2400	0.212	30	2400	0.204	38.1
2700	0.199	28.1	2700	0.195	35.7

3000	0.195	32.7	3000	0.185	25.8
3600	0.168	26.5	3600	0.168	22.2
5400	0.169	16.2	5400	0.177	19.4
6600	0.129	12	6600	0.137	16.9

10.3.2 Elektrolyt E2

Tabelle 10 Messtabelle der Zellen E2_1 und E2_2.

Zelle E2_1			Zelle E2_2		
t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)	t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)
10	0.27	13.5	10	0.269	12.3
30	0.288	13.3	30	0.294	12.4
60	0.275	12.2	60	0.276	11.7
90	0.271	10.7	90	0.27	11.5
120	0.274	10.8	120	0.263	11.1
180	0.262	10.8	180	0.256	10.9
240	0.214	10.7	240	0.252	11.2
300	0.216	10.5	300	0.24	10.8
360	0.213	10.6	360	0.228	10.7
420	0.219	10.6	420	0.225	10.5
480	0.219	10.2	480	0.223	10.3
540	0.204	10.4	540	0.229	10.3
600	0.202	10	600	0.229	10.4
660	0.22	10.4	660	0.23	10.5
720	0.224	10.1	720	0.23	10.3
780	0.229	19.6	780	0.231	10
840	0.227	9.6	840	0.229	9.9
900	0.22	9	900	0.229	9
960	0.22	9.4	960	0.227	8.9
1020	0.228	9.2	1020	0.23	9.5
1080	0.229	9.1	1080	0.225	8.9
1140	0.229	9.1	1140	0.226	8.9
1200	0.229	9.1	1200	0.225	8.8
1260	0.222	9	1260	0.227	8.6
1320	0.218	8.7	1320	0.225	8.9
1380	0.215	8.9	1380	0.226	9
1440	0.221	9.4	1440	0.228	9.2
1500	0.219	9.7	1500	0.235	9.6
1560	0.219	9	1560	0.231	9.2
1620	0.218	9	1620	0.227	9.4
1680	0.213	9.1	1680	0.228	9.9
1740	0.214	9.8	1740	0.223	9.9

1800	0.213	9.9	1800	0.225	9.8
2100	0.21	9.5	2100	0.224	10.3
2400	0.218	10.1	2400	0.222	10.2
2700	0.213	10.6	2700	0.224	10.3
3000	0.218	10.3	3000	0.225	10.1
3600	0.214	9.3	3600	0.223	9.5
5400	0.209	8.4	5400	0.211	9
6600	0.224	8.3	6600	0.226	9.8

10.3.3 Elektrolyt E3

Tabelle 11 Messtabelle der Zellen E3_1 und E3_2.

Zelle E3_1			Zelle E3_2		
t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)	t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)
10	0.209	5.4	10	0.21	5.2
30	0.202	4.4	30	0.208	5
60	0.193	4.3	60	0.191	4.8
90	0.186	4.2	90	0.178	4.6
120	0.171	4	120	0.154	4.1
180	0.151	3.9	180	0.156	4.5
240	0.136	3.7	240	0.144	4.6
300	0.143	3.5	300	0.144	4.6
360	0.148	3.5	360	0.149	4
420	0.151	3.3	420	0.145	3.8
480	0.151	3.3	480	0.143	3.7
540	0.149	3.3	540	0.143	3.4
600	0.152	3.3	600	0.135	3.4
660	0.154	3.3	660	0.136	3.7
720	0.151	3.3	720	0.137	3.5
780	0.152	3.3	780	0.136	3.5
840	0.151	3.3	840	0.135	3.2
900	0.15	3.3	900	0.135	3.3
960	0.146	3.3	960	0.135	3.8
1020	0.144	3.2	1020	0.135	3.2
1080	0.147	3.1	1080	0.138	3.1
1140	0.147	3.2	1140	0.139	3.2
1200	0.147	3.2	1200	0.139	3.2
1260	0.145	3.1	1260	0.139	3.2
1320	0.144	3.2	1320	0.138	3.2
1380	0.143	3.1	1380	0.137	3.2
1440	0.144	3.2	1440	0.138	3.2
1500	0.144	3.2	1500	0.144	3.3
1560	0.143	3.2	1560	0.145	3.3
1620	0.144	3.2	1620	0.138	3.2

1680	0.144	3.2	1680	0.14	3.4
1740	0.142	3.1	1740	0.134	3.2
1800	0.143	3.1	1800	0.137	3.3
2100	0.141	3.2	2100	0.135	3.2
2400	0.138	3.2	2400	0.134	3.2
2700	0.135	3.1	2700	0.128	2.9
3000	0.132	3.1	3000	0.133	3.2
3600	0.127	2.9	3600	0.162	2.8
5400	0.131	2.3	5400	0.162	2.7
6600	0.137	4.3	6600	0.156	3.8

10.3.4 Elektrolyt E4

Tabelle 12 Messtabelle der Zellen E4_1 und E4_2.

Zelle E4_1			Zelle E4_2		
t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)	t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)
10	0.199	11.3	10	0.215	12
30	0.198	11.6	30	0.21	11.9
60	0.189	11.6	60	0.2	11.8
90	0.182	11.5	90	0.19	11.6
120	0.179	11.5	120	0.177	11.6
180	0.175	11.5	180	0.15	11.3
240	0.158	11.4	240	0.141	11.1
300	0.154	11.8	300	0.143	11.1
360	0.142	11.5	360	0.152	11.6
420	0.156	11.2	420	0.157	11.4
480	0.154	10.9	480	0.16	10.9
540	0.161	10.8	540	0.158	10.5
600	0.162	10.4	600	0.154	10.3
660	0.158	10	660	0.156	11
720	0.152	10.2	720	0.153	10.9
780	0.153	10	780	0.149	10.3
840	0.148	10.5	840	0.146	10.2
900	0.149	10	900	0.145	10.2
960	0.145	10.3	960	0.142	10.2
1020	0.143	10.6	1020	0.142	10.3
1080	0.145	10.3	1080	0.14	10.2
1140	0.139	10.1	1140	0.14	10
1200	0.137	10.1	1200	0.136	9.7
1260	0.134	9.6	1260	0.136	9.6
1320	0.132	9.6	1320	0.136	9.5
1380	0.134	9.4	1380	0.135	9.6
1440	0.132	9.4	1440	0.133	9.4
1500	0.134	9.5	1500	0.132	9.3

1560	0.127	9.5	1560	0.129	9.1
1620	0.127	9.6	1620	0.13	9.2
1680	0.13	9.4	1680	0.127	8.9
1740	0.132	9.2	1740	0.129	9.1
1800	0.131	9.1	1800	0.126	8.9
2100	0.123	9.2	2100	0.127	8
2400	0.116	6.1	2400	0.123	6.3
2700	0.107	5	2700	0.119	5
3000	0.109	5.3	3000	0.118	5.2
3600	0.102	4.7	3600	0.112	4.8
5400	0.102	5.1	5400	0.109	4.5
6600	0.09	4.7	6600	0.102	4.4

10.3.5 Elektrolyt E5

Tabelle 13 Messtabelle der Zellen E5_1 und E5_2.

Zelle E5_1			Zelle E5_2		
t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)	t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)
10	0.289	12.2	10	0.304	11.3
30	0.288	11.5	30	0.28	11
60	0.262	10	60	0.26	10.2
90	0.257	10.2	90	0.252	9.8
120	0.215	9.5	120	0.237	9.6
180	0.214	9.6	180	0.212	10.3
240	0.173	11.8	240	0.18	10
300	0.188	9.4	300	0.164	9.5
360	0.125	8.7	360	0.12	7.7
420	0.126	9.8	420	0.125	8.6
480	0.156	9.3	480	0.145	8.6
540	0.183	9.6	540	0.156	8.8
600	0.163	9.2	600	0.164	9.2
660	0.166	9.2	660	0.161	8.9
720	0.159	9.1	720	0.165	9.1
780	0.196	9.2	780	0.163	9
840	0.162	9	840	0.167	9.2
900	0.166	9.2	900	0.163	9
960	0.165	9.1	960	0.164	8.8
1020	0.164	9.2	1020	0.167	9
1080	0.162	9.2	1080	0.168	9.1
1140	0.167	9.1	1140	0.169	9.3
1200	0.168	9.2	1200	0.169	9.3
1260	0.166	9.3	1260	0.165	9.1
1320	0.165	9.3	1320	0.165	9.1
1380	0.17	9.4	1380	0.166	9.1

1440	0.163	8.9	1440	0.163	9.1
1500	0.159	8.8	1500	0.165	9.1
1560	0.155	8.8	1560	0.161	9
1620	0.152	8.8	1620	0.162	9
1680	0.159	8.7	1680	0.163	9.1
1740	0.164	8.6	1740	0.164	9.1
1800	0.163	8.6	1800	0.163	9.2
2100	0.167	8.2	2100	0.164	8.5
2400	0.156	8.2	2400	0.151	8.2
2700	0.151	6.1	2700	0.152	6.9
3000	0.141	6.1	3000	0.142	6.3
3600	0.139	5.8	3600	0.146	6.7
5400	0.115	5.7	5400	0.11	5
6600	0.117	5.5	6600	0.109	5.2

10.3.6 Elektrolyt E6

Tabelle 14 Messtabelle der Zellen E6_1 und E6_2.

Zelle E6_1			Zelle E6_2		
t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)	t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)
10	0.193	14.3	10	0.198	14.4
30	0.182	13	30	0.194	13.7
60	0.178	12.8	60	0.184	13.2
90	0.174	12.8	90	0.178	12.5
120	0.17	12.7	120	0.172	12.2
180	0.159	12.1	180	0.165	12.1
240	0.153	12.2	240	0.157	11.9
300	0.154	11.9	300	0.152	11.4
360	0.146	11.7	360	0.146	11.1
420	0.149	11.8	420	0.147	11.3
480	0.147	11.8	480	0.149	11.7
540	0.142	11.8	540	0.144	11.5
600	0.141	11.8	600	0.142	11.4
660	0.142	11.7	660	0.136	11.6
720	0.143	11.8	720	0.135	11.4
780	0.14	11.8	780	0.133	11.5
840	0.141	11.8	840	0.132	11.7
900	0.137	11.7	900	0.131	11.6
960	0.139	11.8	960	0.131	11.3
1020	0.122	11.8	1020	0.128	11.6
1080	0.121	11.7	1080	0.127	11.4
1140	0.12	11.7	1140	0.127	11.5
1200	0.12	11.7	1200	0.126	11.4

1260	0.129	11.7	1260	0.126	11.6
1320	0.12	11.8	1320	0.125	11.5
1380	0.119	11.7	1380	0.125	11.3
1440	0.118	11.7	1440	0.124	11.3
1500	0.118	11.7	1500	0.124	11.4
1560	0.118	11.8	1560	0.124	11.3
1620	0.118	11.8	1620	0.123	11.4
1680	0.117	11.7	1680	0.125	11.6
1740	0.116	11.7	1740	0.123	11.6
1800	0.115	11.7	1800	0.121	11.5
2100	0.118	11.7	2100	0.118	11.2
2400	0.117	9.5	2400	0.123	9.8
2700	0.116	8.5	2700	0.117	8.4
3000	0.113	8.5	3000	0.115	8.4
3600	0.108	8.4	3600	0.114	8.8
5400	0.106	9.6	5400	0.101	10.7
6600	0.111	9.5	6600	0.125	7.4

10.3.7 Elektrolyt E7

Tabelle 15 Messtabelle der Zellen E7_1 und E7_2.

Zelle E7_1			Zelle E7_2		
t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)	t (s)	U _{sc} (V)	I _{sc} (μA)
10	0.417	64	10	0.415	62.9
30	0.417	66.4	30	0.415	63
60	0.415	68	60	0.424	67.1
90	0.411	67.8	90	0.423	67.2
120	0.41	67.5	120	0.419	66.9
180	0.407	63.7	180	0.418	65
240	0.404	73.3	240	0.414	65.9
300	0.402	73.8	300	0.413	67.7
360	0.402	77.8	360	0.411	71.5
420	0.402	77.9	420	0.41	75.4
480	0.4	76.9	480	0.406	80.6
540	0.399	80.6	540	0.405	80.2
600	0.398	80.7	600	0.404	80
660	0.399	85.2	660	0.403	79
720	0.396	83	720	0.403	82.2
780	0.396	84.1	780	0.399	85.6
840	0.396	88.5	840	0.399	91.5
900	0.395	86.3	900	0.398	89.8
960	0.394	88	960	0.398	93.7
1020	0.395	89.1	1020	0.397	90.5

1080	0.394	89.6	1080	0.396	94.2
1140	0.394	91.5	1140	0.394	96.1
1200	0.393	91.8	1200	0.394	91.4
1260	0.392	92.8	1260	0.393	90.4
1320	0.391	93.7	1320	0.392	92.7
1380	0.392	96.3	1380	0.392	91.6
1440	0.391	97.3	1440	0.392	97.8
1500	0.392	102.6	1500	0.391	99.4
1560	0.39	100.1	1560	0.391	102.4
1620	0.389	100.7	1620	0.39	104.5
1680	0.389	106.1	1680	0.39	104.5
1740	0.388	103.4	1740	0.39	103.7
1800	0.387	105	1800	0.39	105.5
2100	0.385	114.1	2100	0.386	109.9
2400	0.382	108.7	2400	0.384	109.7
2700	0.385	125.9	2700	0.382	120.5
3000	0.38	117.3	3000	0.381	110.6
3600	0.376	115.2	3600	0.378	117.6
5400	0.399	111	5400	0.396	109.6
6600	0.401	110.2	6600	0.4	108

11 Arbeitsjournal

Datum (Dauer)	Eintrag
05.05.2020 (1 h)	Recherche, Materialliste aufgestellt --> wie weiter: sind diese Materialien vorhanden?, genaue Experimentplanung und Liste der zu testenden Elektrolytsysteme, ETH anfragen für Erweiterung der Arbeit
13.05.2020 (1.5 h)	Recherche zu Elektrolyten, die spannend wären zu testen und Lösungsmitteln --> Infos zu Elektrolyten und Lösungsmittel (2 sehr spannende Quellen) --> ETH anfragen, Meeting mit Frau Streiff
14.05.2020 (0.2 h)	Mail an Prof. Victor Mougel von der ETH --> Antwort abwarten
01.06.2020 (3h)	Recherche zu Elektrolyten, provisorische Liste zusammengestellt -->wie weiter: Besprechung der Liste
02.06.2020 (3h)	Liste vervollständigt (Chemikalien und Geräte), Gefahren der Stoffe, Recherche, Experimentaufbau -->wie weiter: Materialien besorgen (Laborant) und erstes Versuchsexperiment durchführen
16.06.2020 (2h)	Recherche, Mail an Julian Arnold, Quellen "aufgeräumt", geordnet und kurz beschrieben was wichtig ist und was ich benutzen will davon ---> Maturitätsarbeit von Julian Arnold lesen, Maturitätsarbeit in der Schule lesen, Mail an ETH, Platten für erstes Experiment besorgen, mit Frau Streiff besprechen, wann das erste Experiment gemacht werden kann
27.-30.06.2020 (2 h)	Vorexperiment genauer geplant, Messwerte angeschaut, Julian Arnold's Arbeit gelesen und überlegt was ich davon "aufnehmen" könnte, Aufbau meiner Maturitätsarbeit entworfen (Frau Streiff nach Meinung fragen) --> Vorexperiment durchführen -->Messwerte anschauen (evt. Mit Herrn Spengler anschauen)
02.06.2020 (2h)	Vorexperiment durchgeführt, Ergebnisse dokumentiert, kurzen Bericht geschrieben --> planen des nächsten Experiments, Materialliste für zuhause
07.07.2020 (2h)	Experimentplanung, wie stelle ich die Elektrolyten her?, Materialliste -->abklären ob die Stoffe erhältlich sind -->Elektrolyte im Labor herstellen -->Materialien von der Schule ausleihen
09.07.2020 (2h)	Herstellung der Elektrolyten 1 bis 4 im Labor in der Schule -->Liste der mitgenommenen Sachen gemacht, Elektrolyten nach Hause genommen
17.07.2020 (1.5h)	Herstellung der Elektrolyten 5 und 6, kurzer Bericht über Herstellung der Elektrolyten geschrieben --> Vorbereitung und Durchführung der Messungen
29.07. - 31.07.2020 (14 h)	Durchführung der Experimente --> Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung (wie haben sie sich mit der Zeit verändert) gemessen --> nächste Schritte: Theorie schreiben, Elektrolyte vergleichen, wie mache ich am besten die IV-Kurve?
07.09.2020 (1h)	Theorie, Funktion des Elektrolyten geschrieben, Vorgang im Elektrolyten in der Zelle -->Theorie fertiggeschrieben

	-->Materialien und Methoden
21.09.2020 (2 h)	Theorie weitergeschrieben --> Geschichte der Grätzel-Zelle und Aufbau und Funktion der einzelnen Komponenten
22.09.2020 (2.5h)	Teil "Herstellung der Elektrolyten" --> Frage an Frau Streiff zu der Beschreibung der Herstellung; an Materialien und Methoden weiterschrieben
26./27.09.2020 (2h)	Materialien und Methoden: Herstellung der Grätzel-Zellen, Messungsaufbau und Messablauf schreiben --> Text überarbeiten; Materialliste machen
5.-8.10.2020 (16h)	Messung 2 der Elektrolyte 1-7, Messung des Elektrolyten 4 wurde zweimal gemacht, da beim ersten Mal die falsche Seite der Gegenelektrode nach innen zeigte --> Resultate mit Diagrammen darstellen und analysieren
0.9.10.2020 (1h)	Resultate der Messungen als Diagramme darstellen und Messungen miteinander vergleichen --> Messungen zeigen in allen Fällen die gleiche Entwicklung der Grätzel-Zellen-Leistungen über die gemessene Zeit --> als nächstes: Resultate in Arbeit einbeziehen und Grätzel-Zellen vergleichen
14.10.2020 (3h)	Physikalischer Teil der Theorie: einlesen und Notizen machen; was ist wichtig für die Leser, um meine Arbeit zu verstehen?; Größen zur Beschreibung der Zellen --> physikalischen Theorieteil fertig schreiben; jemandem zum Lesen geben, um zu kontrollieren, ob alles verständlich ist
15.10.2020 (2h)	Literaturverzeichnis überarbeiten, Theorieteil allgemein vervollständigen --> Resultate vervollständigen; ganzen Theorieteil überarbeiten; wirtschaftliche Bedeutung schreiben
18.10.2020 (4h)	Grundüberlegung, Abkürzungsverzeichnis, Kontrolle der Formeln, verschiedene Verbesserungen --> Weiteres Vorgehen: siehe To-Do-Liste 18.10.2020
26.10.2020 (2.5h)	Detaillierte Auswertung der Messergebnisse, Ranglisten erstellt --> Weiteres Vorgehen: Diskussion schreiben, mit Herr Spengler absprechen, welche Vergleiche Sinn machen
27.10.2020 (2h)	Diagramme für die Vergleiche noch einmal neu gemacht; Ranglisten eingefärbt; Bilder eingefügt; Mail an Herr Spengler --> Weiteres Vorgehen: Diskussion schreiben, Mail von Herr Spengler abwarten
03.11.2020 (2h)	Diskussion angefangen zu schreiben, Einleitung angefangen, neue Quellen gefunden --> noch keine Antwort von Herr Spengler --> Weiteres Vorgehen: Diskussion, Einleitung fertig; dann: Überarbeiten
08./09.11.2020 (3h)	Recherche und weiter an Diskussion geschrieben; wie gliedere ich die Diskussion am besten?; Farben der Elektrolyten-Fotos --> an Diskussion weiterschreiben; Wochenende: Überarbeitung
14.11.2020 (2h)	Interpretation der Kurvenverläufe; Einfluss der Temperatur und der Beleuchtung auf die elektrischen Eigenschaften --> fertig schreiben der einzelnen Interpretationen
15.11.2020 (1h)	Fertig schreiben der einzelnen Interpretation zu den Kurvenverläufen --> Interpretation der Vergleiche

17.11.2020 (2.5h)	"Reinschrift" der Interpretation; ich hatte ein paar neue Überlegungen und Gedankengänge; Umsetzung des mit Herrn Spengler Besprochenen --> Änderung des Vergleich-Diagrammes --> will ich Interpretation zum Vergleich mit einzelnen Kurven-Interpretation vereinen oder getrennt lassen? --> Vergleich zum herkömmlichen Elektrolyten
19.11.2020 (2.5h)	Diagramme der Vergleiche noch einmal neu gemacht (genaue Kurven machen mehr Sinn als 3 Referenzpunkte, die nur eine "Trendline" zeigen); Interpretation der Vergleiche und Ranglisten --> Diskussion schreiben; Zusammenfassen und Beantwortung der Fragestellung --> Einleitung, Vorwort, Abstract schreiben
23.11.2020 (3h)	Diskussion/ Beantwortung der Fragestellung geschrieben; Zusammenfassung und Ausblick; noch einige Ideen und Änderungen notiert --> Änderungen vornehmen --> Einleitung etc. schreiben --> Überarbeitung
28.11.2020 (3h)	Einleitung, Vorwort, Abstract geschrieben --> ganze Arbeit überarbeiten --> Korrektur lesen lassen --> Layout
30.11.2020 (2h)	Einleitung, Abstract, Vorwort, Diskussion überarbeitet, Korrektur von Selma angeschaut und umgesetzt --> Literatur-, Abbildungs-, Tabellenverzeichnis überarbeiten --> Layout überarbeiten
5.12.2020 (4h)	Kleinere Korrekturen, Layout, Literatur-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis überarbeitet/kontrolliert, Anhang: vollständige Messtabellen --> Korrektur --> Korrektur Rechtschreibung --> Titelseite
6.12.2020 (8h)	Letzte Änderungen und Anpassungen (Layout, ...), Design des Titelbildes, Literatur- Abbildungs- und Tabellenverzeichnis noch einmal neu, Seitenzahlen einrichten, Anhang vervollständigt, Korrekturen --> noch einmal lesen (letzter Schliff) --> drucken

12 Authentizitätserklärung

Ich, Tamara Leuthold, bestätige hiermit, dass ich die vorliegende Maturitätsarbeit mit dem Titel „Alternative Grätzel-Zellen – Einfluss unterschiedlicher Redoxpaare auf die elektrischen Eigenschaften einer Grätzel-Zelle“ selbständig und ohne unerlaubte Hilfe verfasst habe. Sämtliche benutzten Quellen und Hilfsmittel sind vollständig und abschliessend im Quellenverzeichnis angegeben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss übernommen wurden, sind eindeutig und wiederauffindbar kenntlich gemacht. Die vorliegende Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form nicht veröffentlicht worden.

Ort und Datum:

Unterschrift: