



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Tim Christian Heino Wetegrove

Modellaufbau eines hybriden Systems zur  
regenerativen Energieversorgung

Tim Christian Heino Wetegrove

Modellaufbau eines hybriden Systems zur  
regenerativen Energieversorgung

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. Gustav Vaupel  
Zweitgutachter : Prof. Dr. Henry Reetmeyer

Abgegeben am 14. Oktober 2013

**Tim Christian Heino Wetegrove**

**Thema der Bachelorthesis**

Modellaufbau eines hybriden Systems zur regenerativen Energieversorgung

**Stichworte**

Modellaufbau, Regenerative Energien, Windgenerator, Solarzelle, hybrid Laderegler, Batterieüberwachung, Laborversuch

**Kurzzusammenfassung**

Im Rahmen dieser Bachelorthesis wird ein Prototyp eines Modellversuches mit regenerativen Energien entwickelt. Es werden die für dieses Modell geeigneten Energiequellen ermittelt, die zugehörigen Grundlagen verständlich erklärt und ein praxisnaher Aufbau durchgeführt und Bewertet.

**Tim Christian Heino Wetegrove**

**Title of the paper**

Development and construction of a hybrid system for renewable energy supply

**Keywords**

Model development, renewable energies, wind generator, solar cell, hybrid charge controller, Battery monitoring, Laboratory experiment

**Abstract**

As part of this bachelor thesis is the development of a model experiment prototype for renewable energies. Suitable energy sources are being identified and fundamentals being explained in order to develop a practical setup which will be benchmarked.

*Ich widme diese Arbeit meinem Vater*

*Heinrich (Heino) Wetegrove*

*07.02.1936 – 15.04.2012*

*Vielen Dank, dass du immer an mich geglaubt und  
mich in meinen Leben und im Studium  
stets uneingeschränkt unterstützt hast.*

## **Danksagung**

Hiermit möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Gustav Vaupel für die Betreuung dieser Arbeit und bei Herrn Prof. Dr. Henry Reetmeyer für die Übernahme der Zweitprüfung bedanken.

Weiterhin danke ich Herrn Frank Korpel, der mir bei vielen Technischen Fragen im Labor stets behilflich war.

Ein ganz herzlicher Dank geht an meine Mutter Renate Wetegrove für die liebevolle Unterstützung und das Vertrauen während meines gesamten Studiums.

Auch möchte ich mich ganz herzlich bei Madlen Bonkalla bedanken, die in all dieser Zeit an mich und mein Studium geglaubt hat, mich stets moralisch gestärkt und den Rücken frei gehalten hat.

## **Inhaltsverzeichnis**

Widmung .....	4
Danksagung .....	5
Inhaltsverzeichnis .....	6
Abbildungsverzeichnis .....	7
Tabellenverzeichnis .....	8
1. Einleitung .....	9
2. Grundlagen .....	10
2.1 Die Solarzelle in der Theorie .....	10
2.1.1 Aufbau einer Solarzelle .....	10
2.1.2 Arten von Solarzellen .....	14
2.1.3 Ersatzschaltbild und Kenngrößen einer Solarzelle .....	15
2.1.4 Spektrum der Sonne und anderen Lichtquellen .....	17
2.2 Der permanenterregte Gleichstromgenerator in der Theorie .....	19
2.2.1 Elektromechanische Energiewandlung .....	19
2.2.2 Aufbau des permanenterregten Gleichstromgenerators .....	21
2.3 Der Abwärtswandler in der Theorie .....	25
3. Der Modellversuch .....	27
4. Auswahl der Komponenten .....	29
4.1 Solarzelle und Beleuchtung .....	30
4.1.1 Aufnahme der Solarkennlinie .....	33
4.2 Der Generator .....	39
4.3 Der Energiespeicher – die Batterie .....	43
4.4 Der Abwärtswandler .....	45
4.5 Die Spannungsüberwachung .....	48
4.6 Der Verbraucher .....	51
4.7 Aufbau der Ladereglerschaltung .....	53
5. Erprobung des Ladereglers .....	57
6. Fazit und Ausblick .....	60
Literaturverzeichnis .....	61
Anhang .....	63
Versicherung über die Selbstständigkeit .....	64

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eigenleitung.....	10
Abbildung 2: Dotierung .....	11
Abbildung 3: p-n-Übergang.....	11
Abbildung 4: Aufbau einer Solarzelle.....	12
Abbildung 5: Monokristalline Solarzelle .....	14
Abbildung 6: Polykristalline Solarzelle .....	14
Abbildung 7: Dünnschicht Solarzelle .....	14
Abbildung 8: Ersatzschaltbild einer Solarzelle .....	15
Abbildung 9: I-U Kennlinie .....	16
Abbildung 10: Mit Si-Zellen Nutzbare Energie am Sonnenspektrum .....	17
Abbildung 11: Spektren verschiedener Lichtquellen.....	18
Abbildung 12: Modell elektromechanische Energiewandlung.....	19
Abbildung 13: Aufbau eines Gleichstromgenerators.....	21
Abbildung 14: Spannungskurve .....	22
Abbildung 15: Ersatzschaltbild Gleichstromgenerator .....	22
Abbildung 16: Permanentenerregter Gleichstrommotor .....	24
Abbildung 17: Schaltbild Tiefsetzsteller .....	25
Abbildung 18: Entwurf des Versuchsaufbaus .....	27
Abbildung 19: Auswahl Beleuchtung .....	30
Abbildung 20: Technische Daten Beleuchtung.....	31
Abbildung 21: Solarzelle Hochschulbestand.....	31
Abbildung 22: Solarmodul Fa. Conrad.....	32
Abbildung 23: Technische Daten Solarmodul Fa. Conrad .....	32
Abbildung 24: Versuchsaufbau Solarkennlinie .....	33
Abbildung 25: Lastwiderstand.....	33
Abbildung 26: Messgerät ABB Metrawatt 2036 .....	34
Abbildung 27: Solarkennlinie Hochschulbestand, Sonnenlicht .....	34
Abbildung 28: Solarkennlinie Hochschulbestand, Halogenstrahler.....	35
Abbildung 29: Solarkennlinie Modul Fa. Conrad, Sonnenlicht.....	36
Abbildung 30: Solarkennlinie Modul Fa. Conrad, Halogenstrahler .....	37
Abbildung 31: Permanentenerregter Gleichstromgenerator mit Übersetzung .....	40
Abbildung 32: Ausschnitt Datenblatt Generator.....	40
Abbildung 33: Testaufbau Generator.....	41
Abbildung 34: Aufbau Generator und Übersetzung .....	41
Abbildung 35: Blei-Gel-Akkumulator.....	44
Abbildung 36: Schaltbild Abwärtswandle .....	45
Abbildung 37: ICL7665, DIP-8 .....	48
Abbildung 38: Schaltung Spannungsüberwachung .....	49
Abbildung 39: Hystereseffekt .....	49
Abbildung 40: Schaltbild Verbraucher .....	51
Abbildung 41: Lampensockel BA15S .....	52

Abbildung 42: Verbraucher Aufbau.....	52
Abbildung 43: Schaltplan Laderegler.....	54
Abbildung 44: Schaltung Oberseite .....	55
Abbildung 45: Schaltung Unterseite .....	55
Abbildung 46: Fertiger Hybrid Laderegler.....	56
Abbildung 47: Aufbau Halogenstrahler und Solarzelle .....	57

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Wirkungsgradmessung Laderegler Solar.....	58
Tabelle 2: Wirkungsgradmessung Laderegler Generator .....	58



## 1. Einleitung

Ein Großteil der in der heutigen Zeit erzeugten elektrischen Energie wird mittels fossiler Brennstoffe zur Verfügung gestellt. Diese sind insbesondere Kohle, Öl und Gas, welche in konventionellen Kraftwerken zu elektrischer Energie umgewandelt werden, sowie radioaktive Brennstoffe, welche in Kernkraftwerken eingesetzt werden um die Versorgung der Industrie und Haushalte weltweit sicherzustellen.

Aufgrund der vermehrten Ressourcenknappheit fossiler Brennstoffe und der damit einhergehenden Preissteigerungen, sowie die Gefahren der Nutzung radioaktiver Elemente zur Energieerzeugung, gibt es ein Bestreben alternative Energiequellen zur Versorgung der Energieverbraucher zu nutzen.

Diese so genannten regenerativen Energien sind hauptsächlich Wind- und Wasserkraft, sowie die Sonnenenergie, welche praktisch in einem unbegrenzten Maße, sowie kostenlos zur Verfügung stehen.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Prototypaufbaus eines Modellversuches zur hybriden Energieversorgung mittels regenerativen Energien. Dieser Aufbau soll einen Einblick in die Problematiken und daraus einhergehender Lösungswege der Nutzung dieser Energieträger beitragen. Er zielt auf die an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) durchgeführten Schülerlabore ab.

Im Rahmen dieser Bachelorthesis werden die Grundlagen für den Modellversuch vermittelt. Daraus leitet sich die Auswahl der Komponenten ab, aus welchen der Aufbau zusammengestellt wird. Abschließend findet eine qualitative Untersuchung der geleisteten Arbeit statt und es wird eine Resümee gezogen.

In dieser Arbeit geht es nicht darum die Netzversorgung mit regenerativen Energien aufzuzeigen oder dessen theoretische Aspekte zu beleuchten. Die Grundlagen werden Anwendungsbezogen auf den späteren Versuch erklärt. Auch soll die Ausarbeitung für den Ablauf eines Laborversuches nicht behandelt werden.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Die Solarzelle in der Theorie

Die Solarzelle oder photovoltaische Zelle (PV-Zelle) ist ein elektrisches Bauelement, das Strahlungsenergie, meist Sonnenstrahlung, direkt in elektrische Energie umwandeln kann. Die Grundlage dieser Energiewandlung ist der photovoltaische Effekt.

#### 2.1.1 Aufbau einer Solarzelle

Solarzellen bestehen aus hochreinem Silizium, dessen Atome jeweils 4 Valenzelektronen besitzen und mit den nächsten Atomen eine Paarbindung bilden. Dadurch erhält jedes Atom scheinbar 8 Elektronen auf der Außenschale, welches die so genannte Edelgaskonfiguration bildet. Durch Zufuhr von Energie in Form von Strahlung lassen sich Elektronen aus dieser Konfiguration herauslösen welche Löcher hinterlassen und es zu einem Stromfluss kommt. Dieser Vorgang bezeichnet man als Eigenleitung.

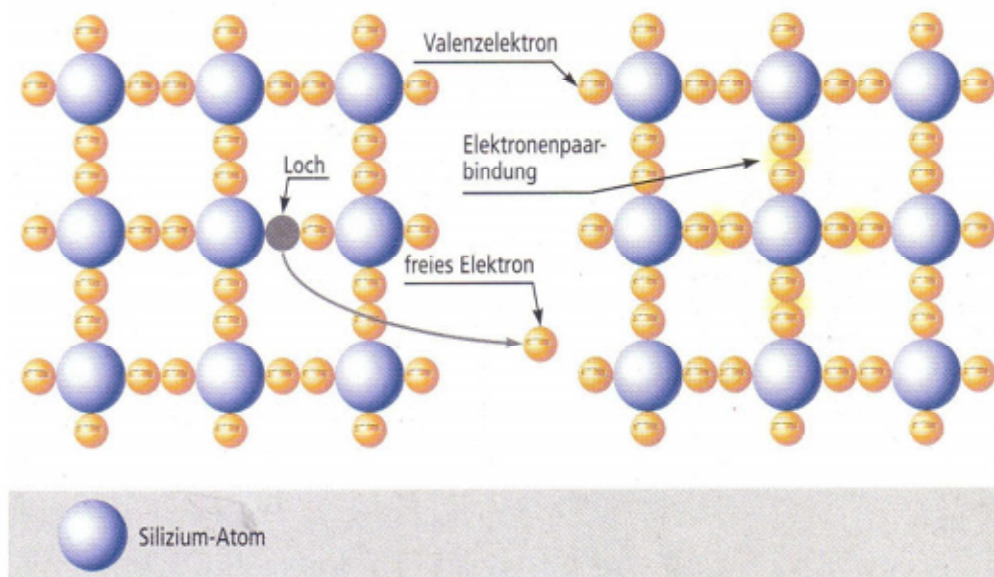


Abbildung 1: Eigenleitung

Um die Fähigkeit dieses Elektronenflusses zu verbessern werden Störatome mit einem zusätzlichen freien Elektron oder einem freien Elektron weniger in die Kristallstruktur eingebracht, das sogenannte Dotieren. Strukturen mit einem zusätzlichen Loch nennt man positiv-dotiert oder p-Halbleiter, Strukturen mit

einem zusätzlichen Elektron werden negativ-dotiert oder n-Halbleiter genannt. Adäquate Störatome sind zum Beispiel Bor (3 Valenzelektronen) oder Phosphor (5 Valenzelektronen), siehe Abbildung 2.

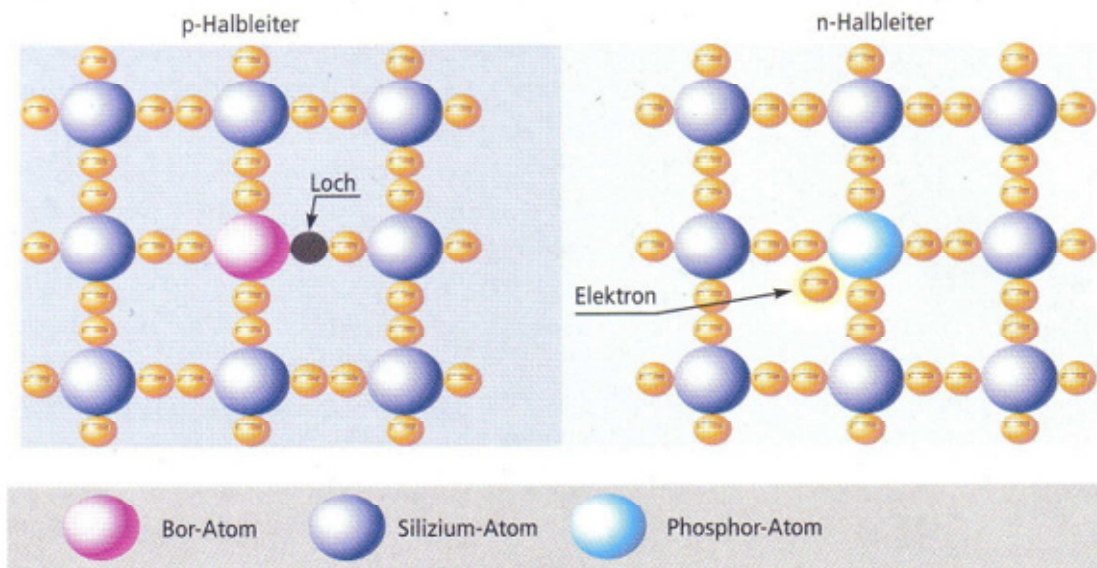


Abbildung 2: Dotierung

Werden nun ein n-Halbleiter und ein p-Halbleiter aufeinandergelegt, so entsteht an der Grenzschicht eine Diffusionsladung wie bei einer Diode. Diese Grenzschicht wird p-n-Übergang genannt. Eine Solarzelle ist demnach eine Diode.

Durch das übereinanderlegen der Halbleiter entsteht durch die unterschiedliche Dotierung ein gerichtetes elektrisches Feld, welches je höher die Dotierung ist, größer wird.

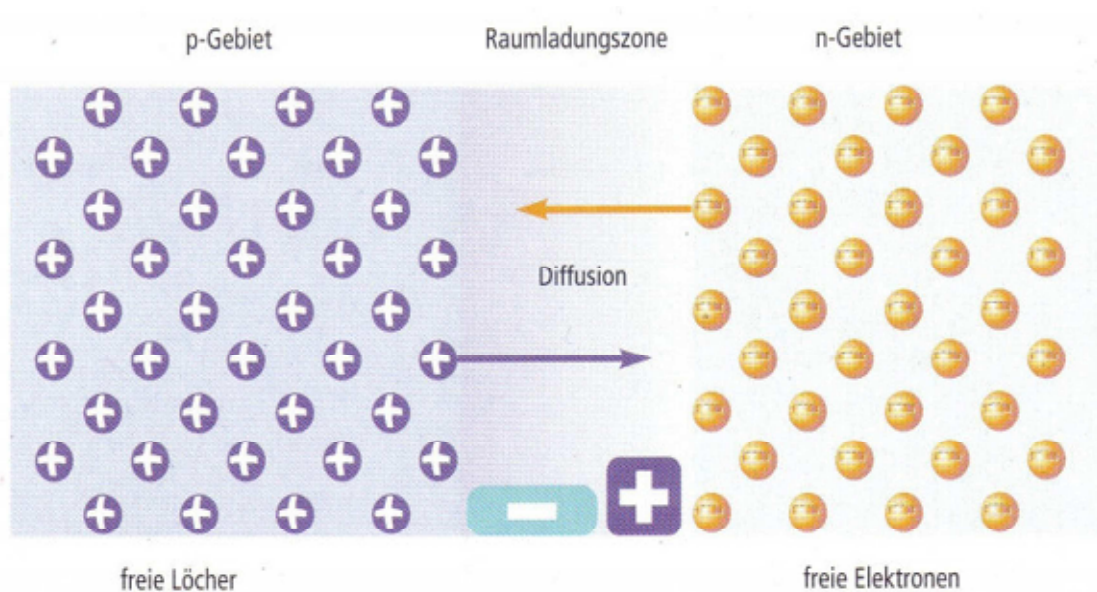


Abbildung 3: p-n-Übergang

Entspricht das elektrische Feld der Diffusionsspannung, so ist die Diffusion beendet.

Wird die Solarzelle nun bestrahlt, so absorbieren Elektronen die Photonen aus dem Licht und erhalten einen höheren Energiezustand, weswegen die Elektronenbindungen aufgebrochen werden. Die freien Elektronen wandern nun durch das elektrische Feld aus dem n-dotierten Gebiet in das p-dotierte Gebiet. Die dabei entstehenden Löcher „wandern“ in umgekehrter Richtung durch die Solarzelle. An den Kontakten der Solarzelle lässt sich somit eine Spannung, die sogenannte Leerlaufspannung messen. Bei einem Kurzschluss dieser Kontakte fließt der Kurzschlussstrom.

Es können allerdings nicht alle Elektronen zur Stromerzeugung genutzt werden. Einige rekombinieren in ihren Ursprungszustand und stehen daher nicht mehr zur Verfügung.

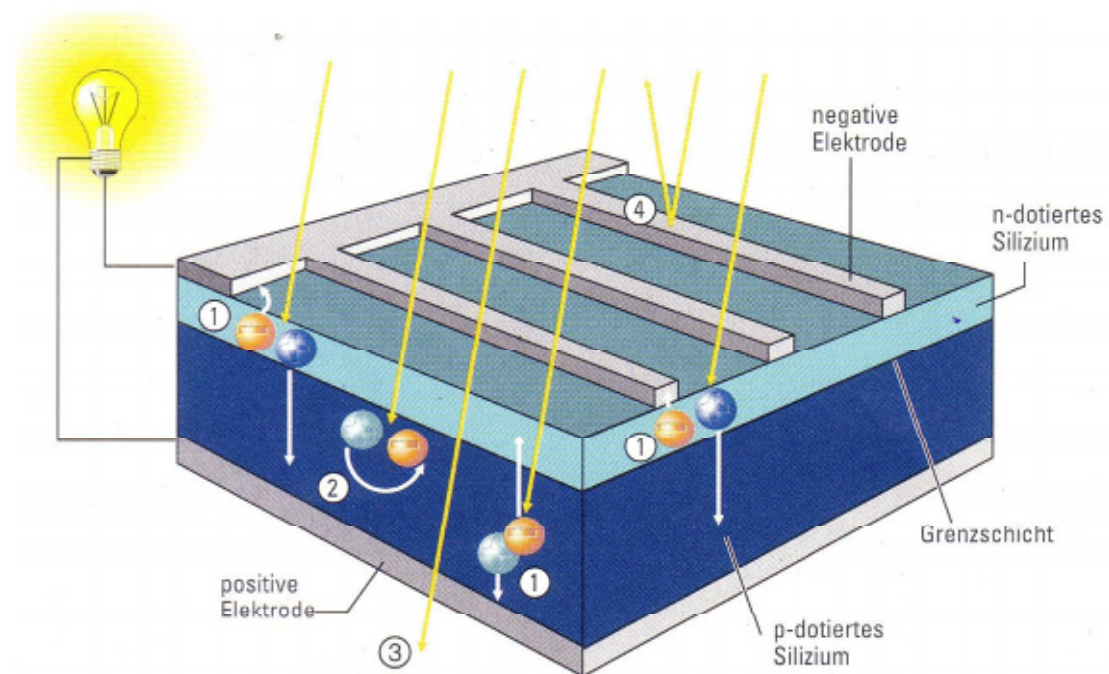


Abbildung 4: Aufbau einer Solarzelle

Abbildung 4 [1] zeigt den Aufbau einer Solarzelle, auf der Oberseite befindet sich die dünn aufgetragene negative Elektrode, darunter folgt die Schicht n-dotiertem Silizium und die Schicht p-dotiertem Silizium. Auf der Unterseite sieht man die großflächig aufgetragene Elektrode. Durch die Elektrode auf der Oberseite entstehen Abschattungen der sich darunter befindlichen Siliziumschichten, was zu Wirkungsgradverlusten führt, welche allerdings nicht zu vermeiden sind. Es wird nun beispielhaft eine Verlustrechnung des Wirkungsgrades für eine polykristalline Solarzelle aufgestellt.

Dazu wird angenommen, dass die eingestrahlte Leistung 100% entspricht, somit lassen sich folgende Prozentuale Abstufung der Verluste ausmachen:

- 32% durch zu viel Photonenenergie durch kurzwellige Strahlung
- 23% durch zu geringe Photonenenergie durch langwellige Strahlung
- 20% durch Potentialgefälle in der Raumladungszone
- 8,5% durch Rekombination
- 3% durch Reflexionen und Abschattung durch die negative Elektrode
- 0,5% durch den Serienwiderstand und Stromwärmeverluste

Es verbleibt somit ein Wirkungsgrad der Solarzelle von 13%

[2] S.2-29

## 2.1.2 Arten von Solarzellen

Wie bereits angedeutet gibt es verschiedene Arten von Solarzellen.

Die **monokristalline Solarzelle** wird aus einer Säule, die aus einem einzigen Siliziumkristall besteht in sehr dünne Scheiben gesägt. Der Siliziumkristall wird aufwändig aus flüssigem Silizium gezogen. Der Wirkungsgrad dieser Art Solarzellen reicht von 14% bis 20%

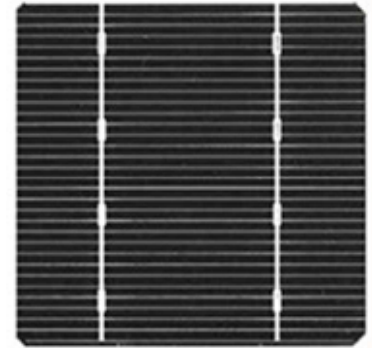


Abbildung 5: Monokristalline Solarzelle

**Polykristalline Solarzellen** werden aus Blöcken gewonnen, die mit flüssigem Silizium gegossen

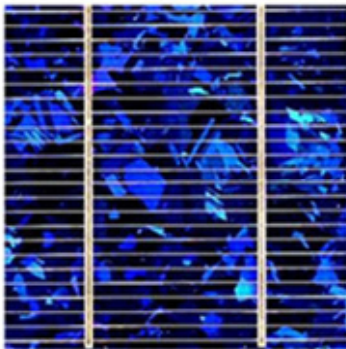


Abbildung 6: Polykristalline Solarzelle

wurden. Dieser besteht aus einer Vielzahl von einzelnen Kristallen, woher die Bezeichnung polykristallin rührt. Typische Wirkungsgrade sind 12% bis 16%. Dieser Typ wird aufgrund ihrer günstigen Herstellungskosten bei einem relativ hohen Wirkungsgrad bevorzugt eingesetzt.

Weiterhin gibt es **Dünnschicht-solarzellen**. Bei Zellen dieses Typs wird die Halbleiterschicht dünn auf eine Glasscheibe aufgebracht und direkt verschaltet, eine zweite Glasscheibe verschließt diese Anordnung. Diese als amorphe Siliziumzellen bezeichnete Anordnung wird aufgrund ihres verhältnismäßig geringen Wirkungsgrades von etwa 6% bis 10% bevorzugt für kleine Geräte mit geringer Leistungsaufnahme, wie zum Beispiel Taschenrechner verwendet. In neuerer Zeit wird allerdings auch diese Modultechnologie immer interessanter, da diese Zellen günstig herzustellen sind und sich mittlerweile auch auf flexiblen Oberflächen so genanntem Laminat auftragen lassen. Zudem büßen diese bei schlechten Lichtverhältnissen und hohen Temperaturen nur einen geringen Teil ihrer Leistung ein. [3] S.10-12, [4], [5]



Abbildung 7: Dünnschicht Solarzelle

### 2.1.3 Ersatzschaltbild und Kenngrößen einer Solarzelle

Im folgenden Kapitel wird das Ersatzschaltbild einer kristallinen Solarzelle behandelt, welches eine Abstraktion der Realität auf ein elektrisches Modell darstellt, damit wird es ermöglicht das Verhalten einer Solarzelle mathematisch zu simulieren.

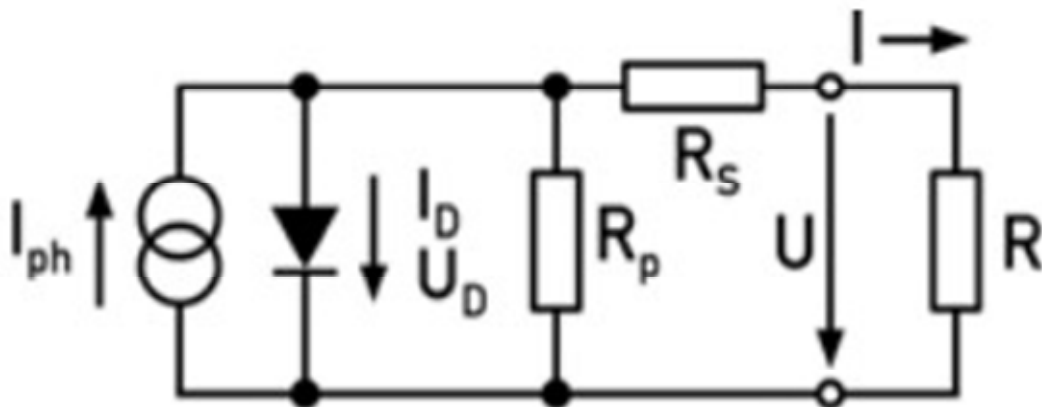


Abbildung 8: Ersatzschaltbild einer Solarzelle

Abbildung 8 [6], S.36 zeigt das Ersatzschaltbild einer kristallinen Solarzelle. Die Stromquelle  $I_{ph}$  ist abhängig von der Bestrahlungsstärke des Moduls. Die Diode repräsentiert die in 2.1.1 beschriebene Anordnung. Es müssen weiterhin die in der Solarzelle entstehenden Verluste durch Kristallfehler, etc. berücksichtigt werden, dies wird mit dem parallelen Widerstand  $R_p$  erreicht. Der serielle Widerstand  $R_s$  repräsentiert Widerstände an den Kontakten und der Zuleitungen der Solarzelle. Zudem findet sich im Ersatzschaltbild der Widerstand  $R$ , welcher einen Verbraucher darstellen soll.

Ein wichtiges Kriterium zur Definierung der Merkmale einer Solarzelle ist die so genannte I-U-Kennlinie. Diese wird experimentell gewonnen in dem der Strom  $I$  über der Spannung  $U$  für verschiedene Belastungen  $R$  aufgetragen wird.

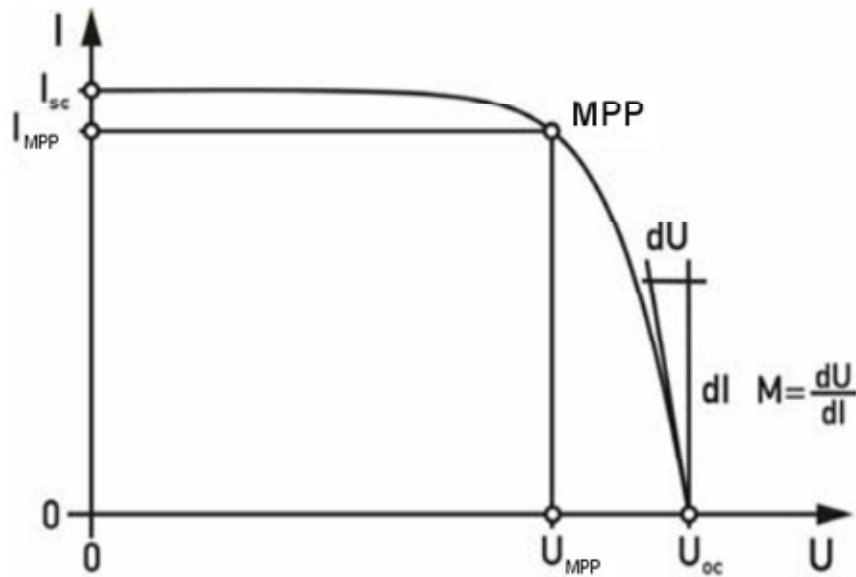


Abbildung 9: I-U Kennlinie

[6],S.39, geändert.

$I_{sc}$  Kurzschlussstrom

$U_{oc}$  Leerlaufspannung

$MPP$  *Maximum Power Point* – Punkt maximaler Leistung

$I_{MPP}$  Strom im MPP

$U_{MPP}$  Spannung im MPP

Der so genannte *Maximum Power Point* (MPP) oder auch  $P_{MPP}$  stellt den Punkt der maximalen realen Ausgangsleistung der Solarzelle dar. Er ist meist gleichzeitig auch der Arbeitspunkt in dem die Solarzelle betrieben wird.

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

Eine weitere wichtige Kenngröße ist der sogenannte *Füllfaktor* ( $FF$ ). Er beschreibt das Verhältnis der Ausgangsleistung im MPP zur maximalen theoretischen Leistung. Somit ergibt sich für den Füllfaktor:

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Eine typische Größe für den Füllfaktor ist  $\sim 0,8$ . Diesen Wert darf man allerdings nicht mit dem Wirkungsgrad einer Solarzelle verwechseln, denn diese ist der Quotient aus der realen Ausgangsleistung zur eingestrahlt Leistung

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{IN}}$$

Dieser Wert ist deutlich niedriger, Beispiele sind in Kapitel 2.1.2 zu finden.



## 2.1.4 Spektrum der Sonne und anderen Lichtquellen

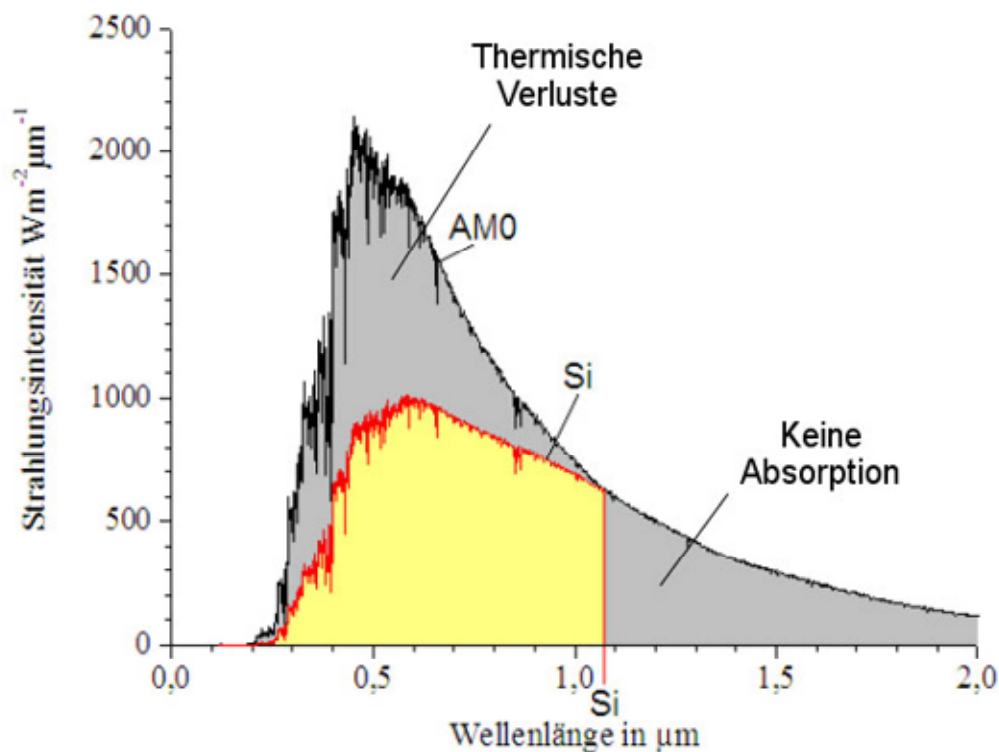


Abbildung 10: Mit Si-Zellen nutzbare Energie am Sonnenspektrum

In der Abbildung 10 [7], S.7 sieht man das eingestrahlte *AM0* Spektrum der Sonne (grau) im Vergleich zu der von Silizium Solarzellen nutzbaren Energie dieses Spektrums (gelb). Der Faktor *AM* bedeutet Airmass oder Luftmasse, es definiert die Länge die das Licht durch die Erdatmosphäre bis zur Erdoberfläche zurücklegt im Verhältnis zur Atmosphärendicke.[8]

Der Wert *AM0* ist dabei ideell, es bedeutet, dass keine Schwächung durch die Erdatmosphäre stattfindet. *AM1* stellt einen senkrechten Einfall der Sonnenstrahlen dar.

Aus der Grafik ist zu erkennen, dass nur ein geringer Teil der eingestrahlten Sonnenenergie von Siliziumzellen absorbiert werden kann. Ein großer prozentualer Anteil der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Verluste ist auf diesen Sachverhalt zurückzuführen.

Soll nun die Sonne in einem Modellversuch gegen eine andere Lichtquelle ausgetauscht werden, so ist das Spektrum der verwendeten Lampen vorher zu betrachten.

Die folgende Grafik [9] zeigt die Spektren unterschiedlicher Lichtquellen. Dabei ist die Intensität (*intensity*) über der Wellenlänge (*wavelength*) aufgetragen.

Die verschiedenen Lichtquellen sind: Tageslicht (*daylight*), Glühlampe (*incandescent*), Leuchtstofflampe (*fluorescent*), Halogenlampe (*halogen*), Kaltweiße LED (*cool white LED*) und Warmweiße LED (*warm white LED*).

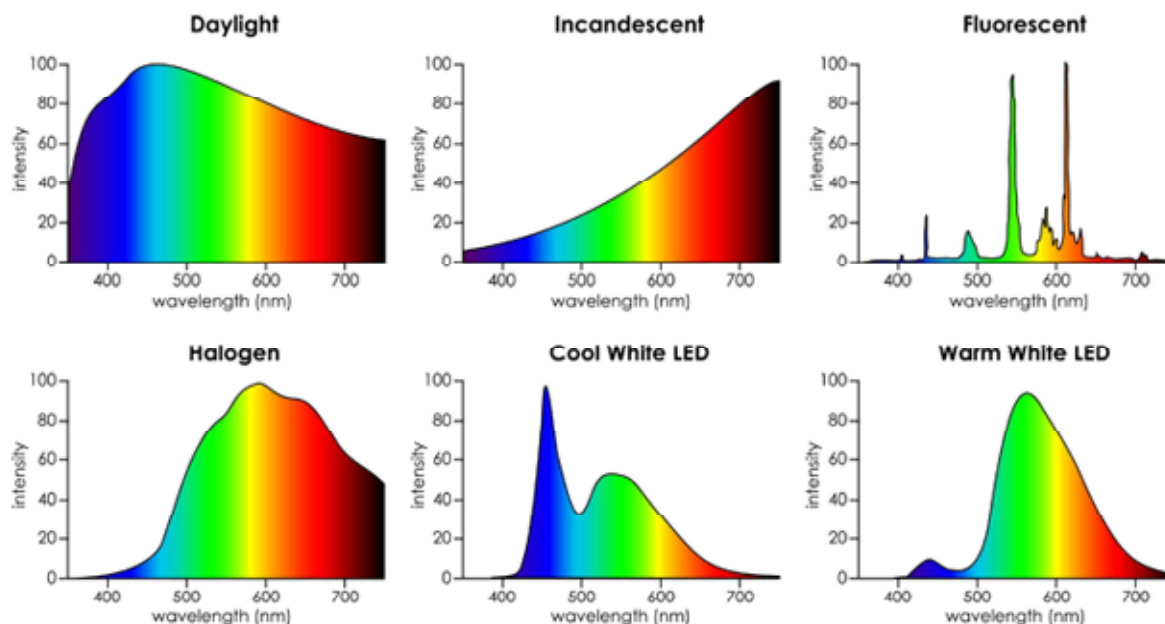


Abbildung 11: Spektren verschiedener Lichtquellen

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Spektren der untersuchten Lichtquellen deutlich unterscheiden und nur wenige davon zu Bestrahlung von Solarzellen in einem Modellversuch geeignet sind. Unterschiede des Tageslichtspektrums mit dem in Abbildung 10 gezeigten Spektrum resultieren aus einer unterschiedlichen Auftragsweise der Intensität in Prozent gegenüber absoluten Werten. Auch ist bei dieser Quelle kein Wert für die Luftmasse angegeben. Dennoch lässt sich an dieser Aufstellung eine Bewertung der zu verwendenden Lichtquellen gut erstellen. Es zeigt sich, dass vor allem Halogenlampen für einen Modellversuch geeignet sind.

## 2.2 Der permanenterregte Gleichstromgenerator in der Theorie

Der permanenterregte Gleichstromgenerator ist eine der ersten elektromagnetischen Energiewandler in der Geschichte. Um dessen Theorie besser zu verstehen wird zuerst das Modell der elektromechanischen Energiewandlung behandelt und dieses später auf den Aufbau des Gleichstromgenerators übertragen.

### 2.2.1 Elektromechanische Energiewandlung

Zur Veranschaulichung der Sachverhalte wird angenommen, dass sich ein Leiter mit der Länge  $l$  in einem homogenen Magnetfeld befindet. Der Leiter ist auf Gleitschienen gelagert, mit welchen er elektrisch verbunden ist, sodass an diesen eine elektrische Spannung abgenommen werden kann.

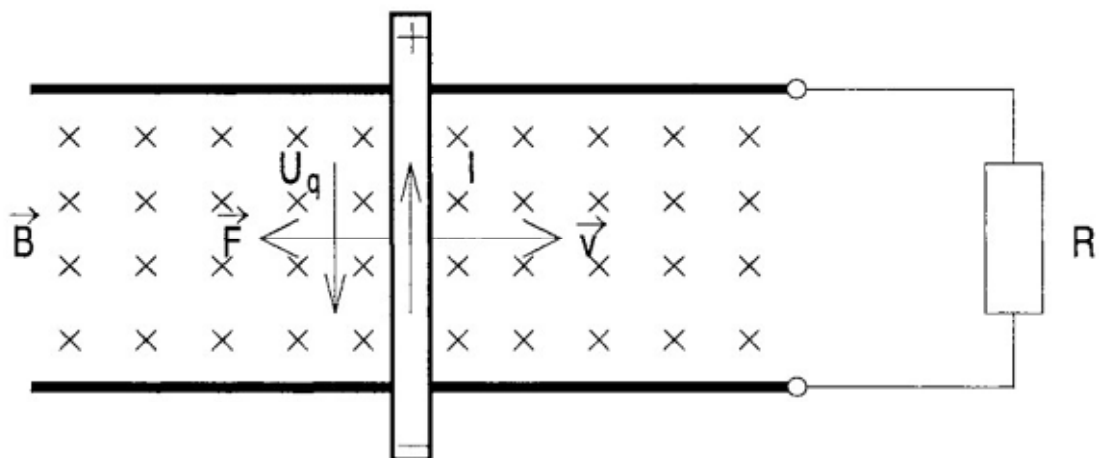


Abbildung 12: Modell elektromechanische Energiewandlung

Abbildung 12 [10], S.6 zeigt den beschriebenen Sachverhalt. Es wird zusätzlich ein Lastwiderstand  $R$  an die Leiterschienen angeschlossen. Wird der Leiter nur mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v$  im homogenen Magnetfeld senkrecht zu den Feldlinien und senkrecht zur Leiterachse bewegt, wird in den Leiter eine Spannung  $U_q$  induziert.

$$U_q = B \cdot l \cdot v$$

- $U_q$ : Quellenspannung oder Urspannung
- $B$ : magnetische Flussdichte
- $l$ : Länge des sich im Magnetfeld befindlichen Leiters
- $v$ : Geschwindigkeit des Leiters

Der an den Gleitschienen angeschlossene Widerstand  $R$  wird folgend des Ohm'schen Gesetzes von einem Strom  $I$  durchflossen:

$$I = \frac{U_{q'}}{R}$$

Es wird somit eine Leistung  $P$  an den Widerstand abgegeben:

$$P_{el} = U_{q'} \cdot I$$

Um diese Leistung zu erbringen ist eine Kraft  $F$  aufzubringen die den Leiter im Magnetfeld bewegt.

$$F = I \cdot B \cdot l$$

Die mechanische Leistung, die dem Generator dabei zugeführt wird ist somit:

$$P_{mech} = F \cdot v$$

Dabei ist Quotient aus elektrisch abgegebener Leistung und mechanisch zugeführter Leistung der Wirkungsgrad  $\eta$ .

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mech}}$$

In diesem Fall ist der Wirkungsgrad  $\eta=1$  bzw. 100%, da noch keine Reibungs- oder Leitungsverluste berücksichtigt wurden.

Um der Realität näher zu kommen wird der Widerstand des Leiters  $R_i$  berücksichtigt. Somit ergibt sich für die Spannung an den Klemmen:

$$U_q = U_{q'} - I \cdot R_i$$

Es zeigt sich somit, dass sich die Klemmenspannung und somit auch die elektrische Leistung des Generators verringert.

Damit folgt für den Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mech}} < 1$$

[10], S.6-9

## 2.2.2 Aufbau des permanentenerregten Gleichstromgenerators

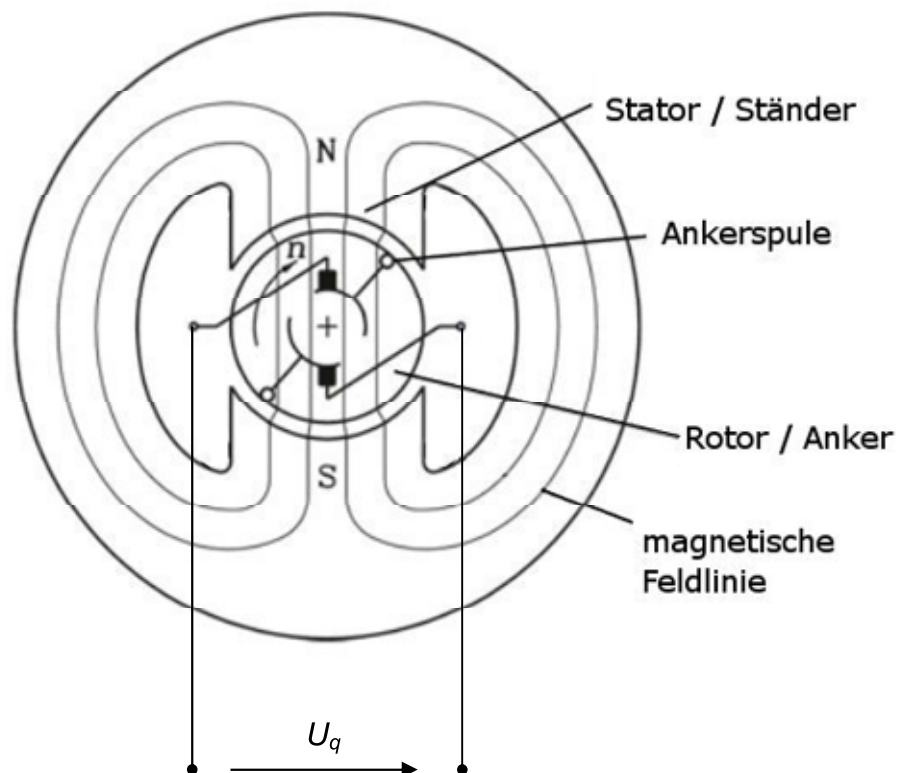


Abbildung 13: Aufbau eines Gleichstromgenerators

Abbildung 13 [11], S.840, (geändert) zeigt eine Schnittdarstellung durch einen zweipoligen permanentenerregten Gleichstromgenerator. Im ortsfesten Stator sind mittels Permanentmagneten Nord- (N) und Südpol (S) angeordnet. Diese erzeugen ein magnetisches Feld, welches die gesamte Anordnung durchläuft. Im Inneren befindet sich ein drehbar auf einer Welle gelagerter Rotor oder auch „Anker“, auf welchem wiederum ein Leiter als Spule, die so genannte Ankerspule aufgebracht ist.

Wird der Rotor mit einer Drehzahl  $n$  in der Anordnung gedreht, so bewegt sich seine Spule durch das Magnetfeld. Durch die so erzeugte Magnetfeldänderung wird eine Wechselspannung in die Drahtwindungen der Spule induziert, eine volle Umdrehung des Rotors entspricht dabei einer Periode. Diese Spannung wird den auf der Welle befindlichen Kollektoren zugeführt, an welchen zwei Bürsten elastisch anliegen und die Spannung  $U_q$  abgreifen. Bei einer Umdrehung der Welle werden dabei die Spulenanschlüsse zweimal vertauscht, was zu einer Gleichrichtung der Spannung führt.

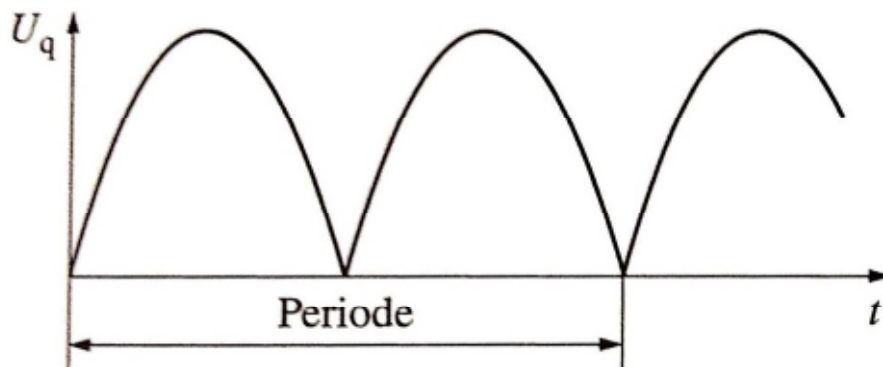


Abbildung 14: Spannungskurve

Die Abbildung 14 [12] zeigt den Spannungsverlauf, der an den Bürsten abgegriffenen Spannung  $U_q$ . Es zeigt sich, dass die Spannung eine große Welligkeit aufweist. Mit zunehmender Anzahl der Ankerspulen und einer entsprechenden Unterteilung des Kollektors lässt sich die Welligkeit immer mehr verringern und es lässt sich eine annähernde Gleichspannung erzeugen.

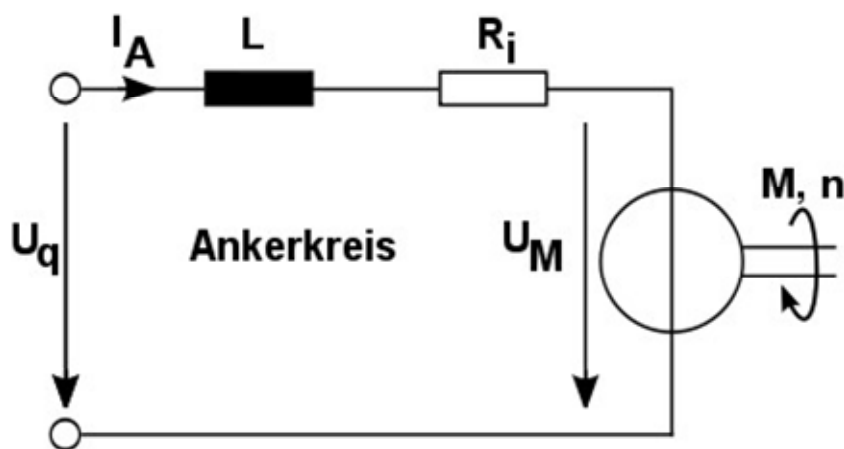


Abbildung 15: Ersatzschaltbild Gleichstromgenerator

Die in dem Kapitel „elektromechanische Energiewandlung“ behandelten Sachverhalte fließen nun in das Ersatzschaltbild des permanentenerregten Gleichstromgenerators (Abbildung 15) ein. Um den Leitungswiderstand  $R_i$  wird eine Induktivität  $L$  ergänzt, die der Induktivität der Ankerspulenanzahl entspricht, welche der Vollständigkeit halber erwähnt werden soll, in der weiteren Betrachtung aber nicht berücksichtigt wird.

Die induzierte Spannung in dieser Anordnung ergibt sich aus der Gleichung für die Quellenspannung aus dem Kapitel „elektromechanische Energiewandlung“:

$$U_{q'} = B \cdot l \cdot v$$

Die Geschwindigkeit  $v$  ist nun nicht linear, sondern eine Drehbewegung, sie wird daher durch die Umfangsgeschwindigkeit

$$v = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r = \omega \cdot r$$

ersetzt. Es werden zudem die gleichzeitig in Reihe geschalteten Drähte der Ankerwicklung  $z$  berücksichtigt. Somit ergibt sich für die induzierte Quellenspannung:

$$U_{q'} = B \cdot l \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r \cdot z$$

- $n$  Drehzahl der Maschine
- $r$  Radius des Ankers
- $z$  Leiterzahl der gleichzeitig in reihe geschalteten Drähte der Ankerspule

Unter Beachtung der Bauart und Beschaffenheit des Generators kann die Generatorgleichung aufgestellt werden:

$$U_{q'} = c \cdot \Phi \cdot n$$

- $c$  Maschinenkonstante
- $\Phi$  magnetischer Fluss

Wird der Innenwiderstand des Generators berücksichtigt, so ergibt sich auch hier für die Spannung an den Klemmen:

$$U_q = U_{q'} - I \cdot R_i$$

Das im generatorbetrieb zu erbringende Drehmoment zum Betreiben einer Last ergibt ist:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{U_q \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

Mit der Generatorgleichung ergibt sich somit:

$$M = c \cdot \Phi \cdot I$$

Aus diesem Sachverhalt lässt sich somit Schlussfolgern, dass die Klemmenspannung des Generators von der Drehzahl abhängt und der Strom vom Drehmoment. Wird der Generator bei der Nenndrehzahl betrieben und eine Last hinzugeschaltet, so muss das aufgebrachte Drehmoment verstärkt werden um die Last zu betreiben.

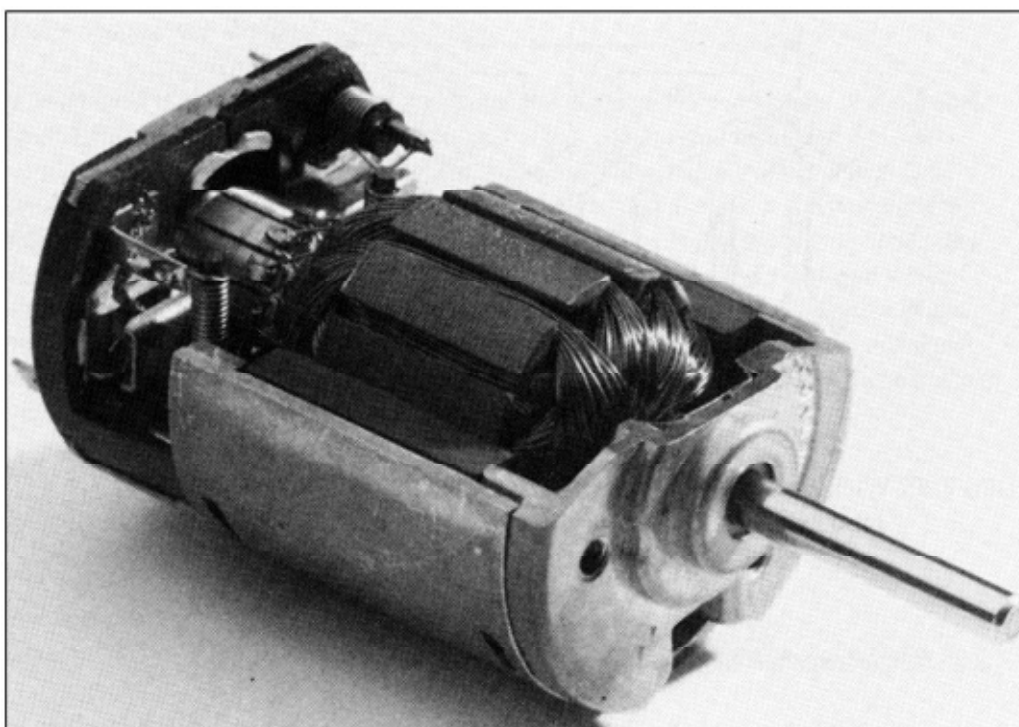


Abbildung 16: Permanenterregter Gleichstrommotor

Die Abbildung 16 [13] zeigt einen Schnitt durch einen permanenterregten Gleichstrommotor (25W, 4000 U/min) der Firma Bühler. Es sind die Angewicklungen und Unterteilungen des Rotors für die Kollektoren zu erkennen. Außen befindet sich der Permanentmagnet.

Gleichstrommotoren lassen sich im Motor, sowie im Generatorbetrieb betreiben. Der Aufbau ist dabei gleichbleibend.



## 2.3 Der Abwärtswandler in der Theorie

Der Abwärtswandler oder auch Tiefsetzsteller ist eine Schaltung, die eine Eingangsspannung  $U_E$  in eine niedrigere Ausgangsspannung  $U_A$  umwandelt. Es handelt sich um einen sogenannten Schaltregler, der im Gegensatz zu Linearreglern bei größeren Differenzen der Ein- und Ausgangsspannungen, sowie bei großen Strömen erhebliche Vorteile im Wirkungsgrad aufweisen.

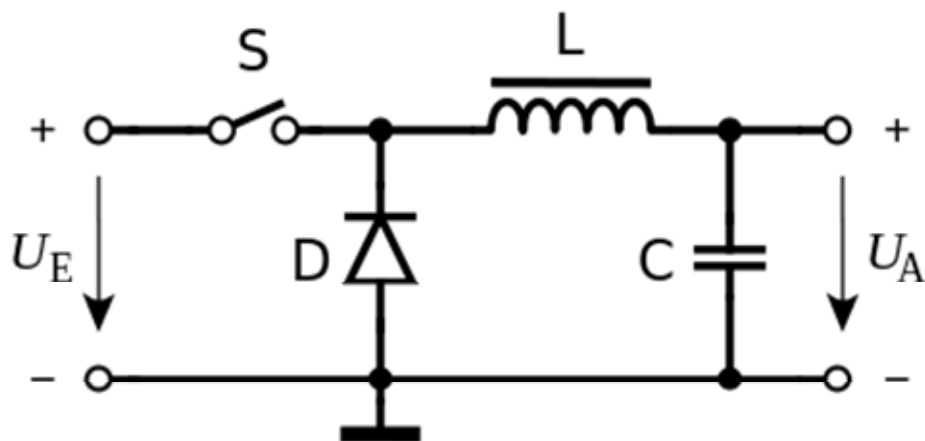


Abbildung 17: Schaltbild Tiefsetzsteller

Abbildung 17 [14] zeigt das Schaltbild eines Tiefsetzstellers. Die Schaltung besteht aus nur wenigen Bauteilen, einer Sperrdiode  $D$ , ein Kondensator  $C$ , einer Spule  $L$  und einem Schalter  $S$ , welcher als Transistor ausgeführt ist. Der Transistor wird mittels einer pulswertenmodulierten Steuerspannung  $U_{St}$  angesteuert welche dessen Schaltzustände (ein und aus) steuert. Die pulswertenmodulierte Steuerspannung wird definiert durch den Quotienten aus Einschaltzeit  $t_E$  und der Periodendauer  $T$ :

$$\frac{t_E}{T} = a$$

Dieser Quotient wird als Tastverhältnis  $a$ , oder Tastgrad bezeichnet. Mittels der Veränderung des Tastgrades ist es möglich die Ausgangsspannung  $U_A$  zu verändern.

Während der Einschaltzeit  $t_E$  des Transistors fließt ein Strom  $I$  durch die Spule  $L$ , die Diode wird in Sperrrichtung betrieben. Ist der Transistor gesperrt, so wird die in der Spule gespeicherte Energie abgebaut und es fließt ein Strom  $I$  durch die Diode bzw. aus dem Kondensator. Die Spannung  $U_D$  welche an der Diode anliegt springt aufgrund der Ein- und Ausschaltvorgänge zwischen der Eingangsspannung  $U_E$  und Null. Durch die Spule und dem Kondensator wird der

Mittelwert dieser Spannung gebildet, aus welcher die Ausgangsspannung  $U_A$  resultiert.

Wenn dabei Strom  $I$  nicht Null wird, so wird dieser Betriebsfall als kontinuierlicher Betrieb bezeichnet und somit gilt:

$$U_A = \frac{t_E}{T} \cdot U_E$$

Es zeigt sich somit, dass die gewünschte Ausgangsspannung mittels der Veränderung des Tastverhältnisses  $a$  angepasst werden kann. Im Umkehrschluss ist es somit möglich eine variable Eingangsspannung auf eine feste Ausgangsspannung zu begrenzen. Dies ist somit ideal für eine Ladereglerschaltung.

### 3. Der Modellversuch

Zur Umsetzung der geforderten Aufgabenstellung soll ein Modellversuch zu einer hybriden Energieversorgung entstehen. Da dieser auch für Schülerversuche an der HAW Hamburg gedacht ist, sind auch Sicherheitsaspekte zu beachten, denn es darf im Rahmen der von Schülern zu bearbeitenden Aufgaben nicht mit berührungsempfindlicher Spannung gearbeitet werden. Weiterhin soll der Versuch die Sachverhalte und Probleme der regenerativen Energieversorgung verständlich erklären.

Die grundlegende Idee zu dem Aufbau ist der Betrieb eines so genannten Inselsystems, bei dem die erzeugte Energie lokal zwischengespeichert wird und sich somit eine autarke Versorgung von Verbrauchern realisieren lässt. Diese Art der Energieversorgung findet unabhängig von einem Stromnetz statt und wird in der Realität oftmals an sehr abgelegenen Standorten verwendet, an denen es zu kostspielig wäre eine Netzversorgung herzustellen. Um sich nicht nur auf einen Energieträger zu verlassen und den Ertrag, der aus der Natur bereitgestellten Energie zu erhöhen wird daher auf ein System aus Solarzellen und gleichzeitig der Betrieb eines Windrades oder eines Laufwassergenerators gesetzt. Somit können sich beide Systeme gegenseitig ergänzen.

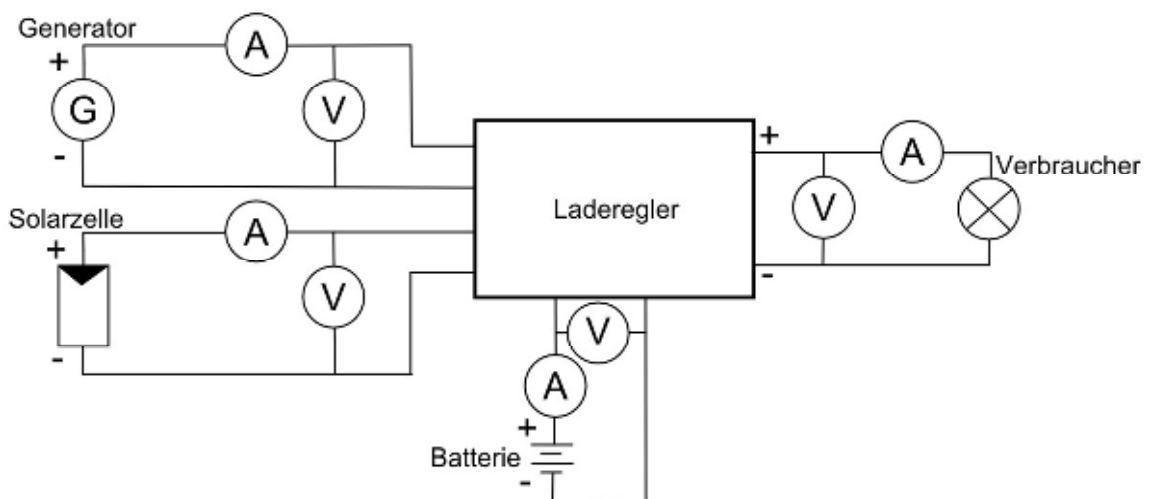


Abbildung 18: Entwurf des Versuchsaufbaus

Die obere Grafik zeigt den Entwurf der geplanten Versuchsanordnung. Als Stromquellen dienen ein per Hand zu drehender Generator und eine von einem Strahler beleuchtete Solarzelle. Mittels des Ladereglers werden die erzeugten Spannungen auf eine gleiche Ebene gebracht und eine Batterie geladen.

Zusätzlich ist eine Spannungsüberwachung der Batterie vorgesehen, damit es nicht zu einer Tiefenentladung oder Überladung kommt. Es ist weiterhin ein Verbraucher vorgesehen, mittels welchem die erzeugte Leistung „sichtbar“ gemacht werden, bzw. die Batterie entladen werden kann.

Alle Spannungen und Ströme können von Messgeräten ermittelt und überwacht werden.

Es ist zu erkennen, dass der Ladereglerschaltung eine große Bedeutung zukommt, denn diese muss ermöglichen die Spannungen, die von unterschiedlichen Erzeugern bereitgestellt werden, unabhängig von einander auf eine batterieverträgliche Spannungsebene zu wandeln.

## **4. Auswahl der Komponenten**

Ein Ziel bei der Auswahl der Komponenten ist, möglichst kostengünstige Standardkomponenten zu verwenden um den Versuchsaufbau später vervielfältigen zu können. Damit wird es ermöglicht gleichzeitig mehrere Stationen dieses Versuches aufzubauen und kleinere Gruppen bei der Bearbeitung zu bilden wodurch der Lern- und Begeisterungserfolg gesteigert werden kann.

Das Budget der Hochschule soll dabei nicht zu sehr belastet werden, denn da es sich hauptsächlich um Schülerversuche handelt, stellen diese nicht das Hauptbetätigungsfeld einer Hochschule –das Studium – dar, allerdings soll der Versuch auch zur Nachwuchsgewinnung und Begeisterung der Schüler für die Elektrotechnik und regenerative Energien dienen.

In den folgenden Kapiteln werden die ausgewählten Bauteile erläutert und etwaige Schaltungen berechnet.

## 4.1 Solarzelle und Beleuchtung

Die Solarzelle dient in diesem Aufbau als einer der beiden Energieerzeuger. Sie soll einem wirklichkeitsgetreuen Einsatz nachempfunden, allerdings unter Laborbedingungen betrieben werden.

Es soll zudem der Mobilität und Flexibilität des Aufbaus Rechnung getragen werden, somit ist eine handliche Größe als Voraussetzung anzusehen.

Als Beleuchtungsquelle für die spätere Solarzelle wird ein Halogenstrahler der Firma Brennenstuhl mit einer elektrischen Leistung von 500W gewählt.



Abbildung 19: Auswahl Beleuchtung

Dieser ist bereits in der Hochschule vorhanden und kann für diesen Versuch genutzt werden. Zudem ist gewährleistet, dass ein vergleichbares Modell zu einem günstigen Preis erneut beschafft werden kann um weitere Versuchsaufbauten zu ermöglichen.

Aus Kapitel 2.1.4 ist ersichtlich, dass ein Halogenstrahler eine gute Approximation der Sonnenstrahlen für Laborversuche darstellt. Allerdings ist zu beachten, dass die Lichtintensität in unter 500nm viel geringer als bei der Sonnenstrahlung ausfällt. Es ist daher mit höheren Verlusten, beziehungsweise einem geringeren Wirkungsgrad zu rechnen.



Abbildung 20: Technische Daten Beleuchtung

Für die Solarzelle wurde versucht aus dem Hochschulbestand ein passendes Modell zu finden. Aufgrund der beschriebenen Anforderungen hat nur ein Modell diese erfüllt.

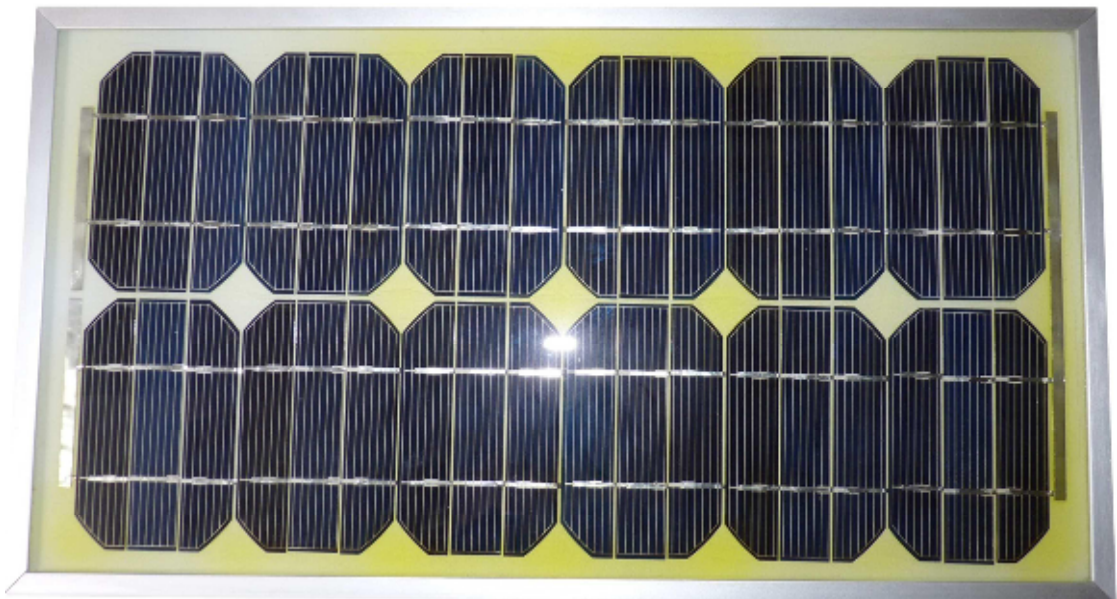


Abbildung 21: Solarzelle Hochschulbestand

Allerdings sind keine Daten für die Solarzelle verfügbar, weshalb die Solarkennlinie experimentell aufgenommen werden muss um die Kennwerte zu ermitteln. Dies ist zudem notwendig, da es sich unter Laborbedingungen um eine Halogen Lichtquelle handelt, welche sich in ihrem Spektrum von der Sonnenstrahlung unterscheidet. Um dies zu verdeutlichen wird die Kennlinie für beide Lichtquellen aufgenommen.

Zudem wurde eine zweite Solarzelle der Firma Conrad beschafft, von welcher die Technischen Daten bekannt sind.



Abbildung 22: Solarmodul Fa. Conrad

Für dieses Solarmodul sind die folgenden technischen Daten aus dem Datenblatt entnommen:

**b) 20W-12V Solarmodul (Best.-Nr.: 110391)**

Leistung:	max. 20 Watt
Leerlaufspannung:	21,6 V
Kurschluss-Strom:	1,22 A
Nennspannung:	17,6 V
Nennstrom:	1,14 A

Abmessungen:	ca. 530 x 340 x 28 mm
Gewicht:	ca. 2,6 kg
Schutzart:	IP65

Abbildung 23: Technische Daten Solarmodul Fa. Conrad

Im Folgenden wurde die Solarkennlinie für beide Module und jeweils Beleuchtung durch Sonnenlicht, sowie dem Halogenstrahler ermittelt. Die Sonnenkennlinien wurden bei vollem Sonnenschein im Sommer aufgenommen, es gab keine Abschattungen, die Intensität ist somit als gleichbleibend anzusehen. Die Umgebungstemperatur betrug 26°C.



### 4.1.1 Aufnahme der Solarkennlinie

Dazu wird folgender Versuch aufgebaut und damit die Kennlinie aufgenommen.

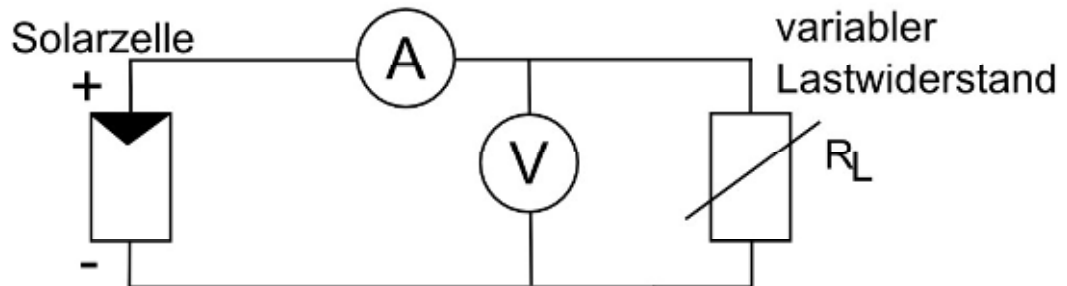


Abbildung 24: Versuchsaufbau Solarkennlinie

Die Solarzelle wird mit einer Lichtquelle bestrahlt und gibt ihre erzeugte Leistung an einen variablen Lastwiderstand ab. Dies ist ein Widerstand aus dem AL-Labor der Hochschule, seine Kenndaten sind:

$$R = 1\Omega - 100\Omega$$

$$I = 1,8A$$

$$I_{max} (15min.) = 2,5A$$

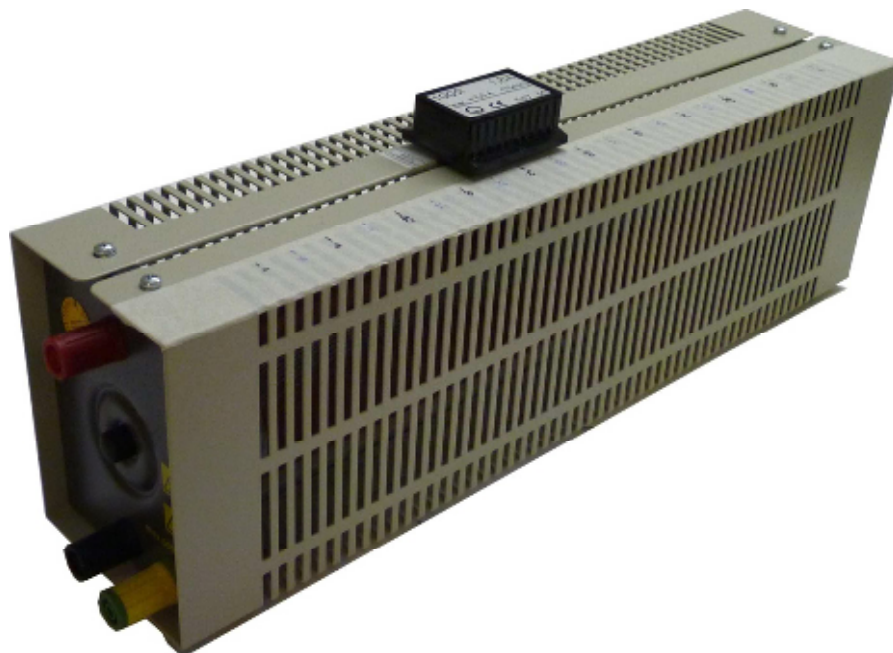


Abbildung 25: Lastwiderstand

Spannung und Strom werden ebenfalls mit Messgeräten aus dem AL-Labor gemessen. Es handelt sich dabei um den Typ Metrawatt M2036 der Firma ABB.

Diese werden auch in den Laborversuchen der Energietechnik und Leistungselektronik eingesetzt und sind in großer Anzahl in der Hochschule verfügbar.



Abbildung 26: Messgerät ABB Metrawatt 2036

Die folgende Kennlinie zeigt das Solarmodul der Hochschule unter Sonneneinstrahlung:

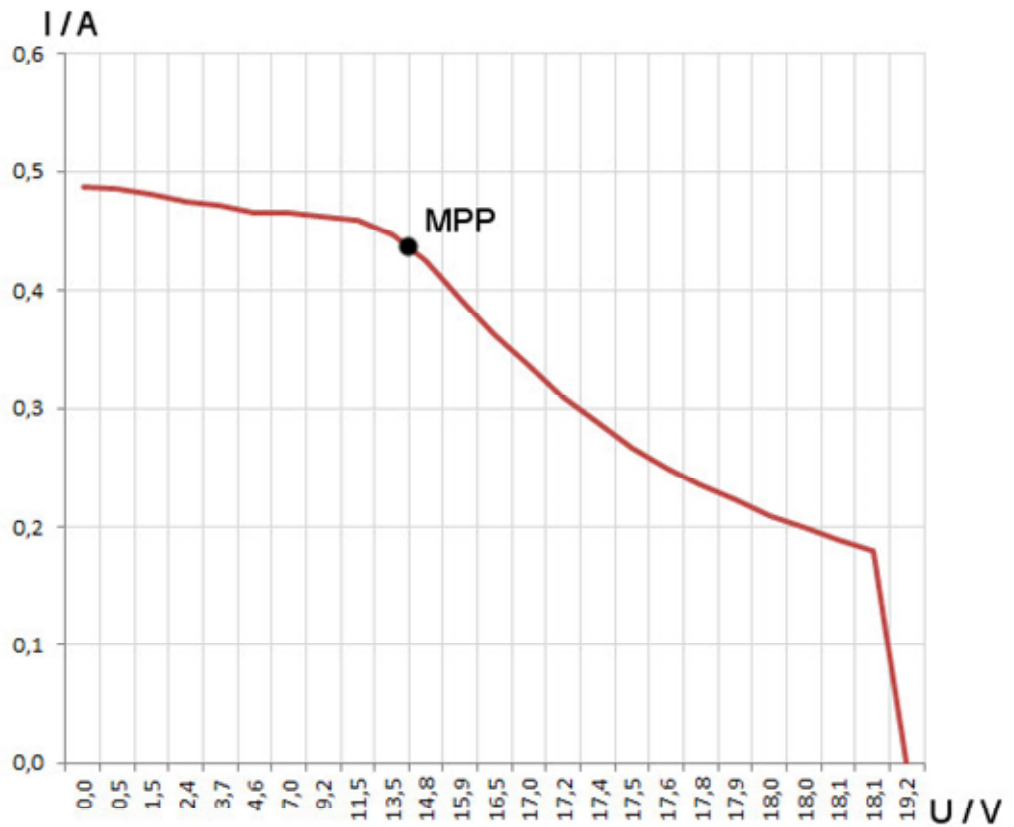


Abbildung 27: Solarkennlinie Hochschulbestand, Sonnenlicht

Folgende Kennwerte konnten ermittelt werden:

$$U_{oc} = 19,231 \text{ V}$$

$$I_{sc} = 0,4847 \text{ A}$$

$$MPP = U_{MPP} \cdot I_{MPP} = 14,83 \text{ V} \cdot 0,425 \text{ A} = 6,298 \text{ W}$$

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = 0,677$$

Die folgende Kennlinie zeigt das Solarmodul der Hochschule unter Bestrahlung mit dem Halogenstrahler:

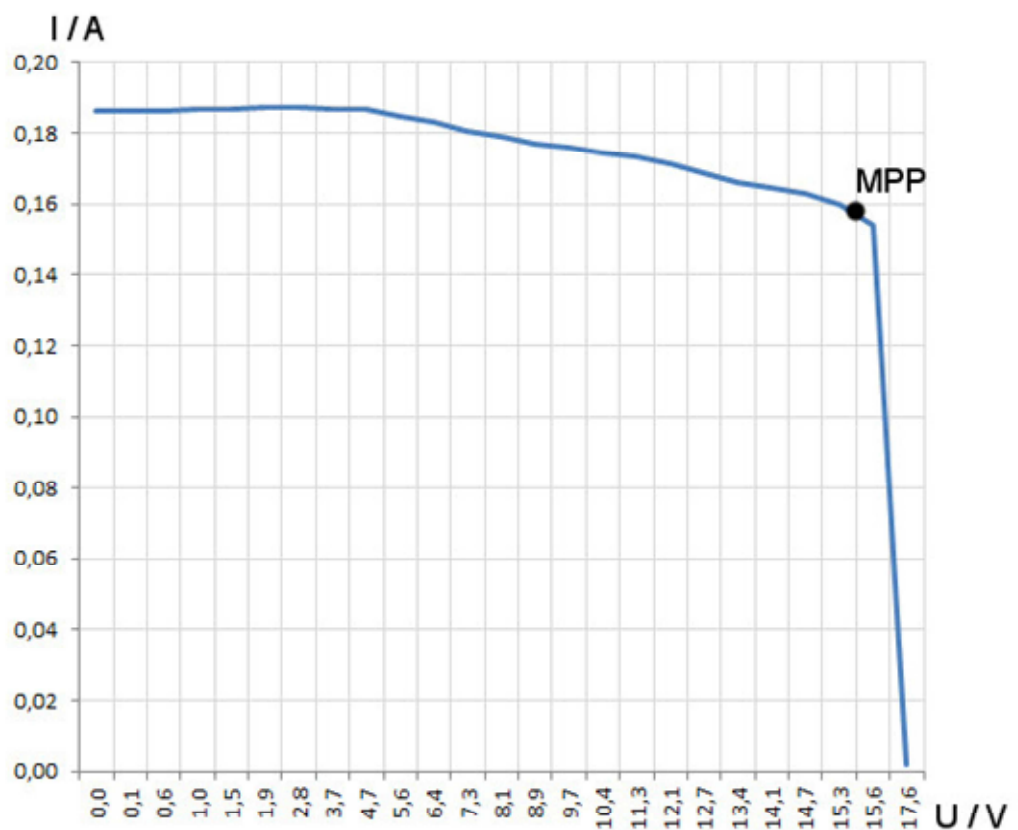


Abbildung 28: Solarkennlinie Hochschulbestand, Halogenstrahler

Folgende Kennwerte konnten ermittelt werden:

$$U_{oc} = 17,551 \text{ V}$$

$$I_{sc} = 0,186 \text{ A}$$

$$MPP = U_{MPP} \cdot I_{MPP} = 15,315 \text{ V} \cdot 0,160 \text{ A} = 2,451 \text{ W}$$

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = 0,750$$

Es folgt die Messung für das Solarmodul der Firma Conrad unter Sonneneinstrahlung:

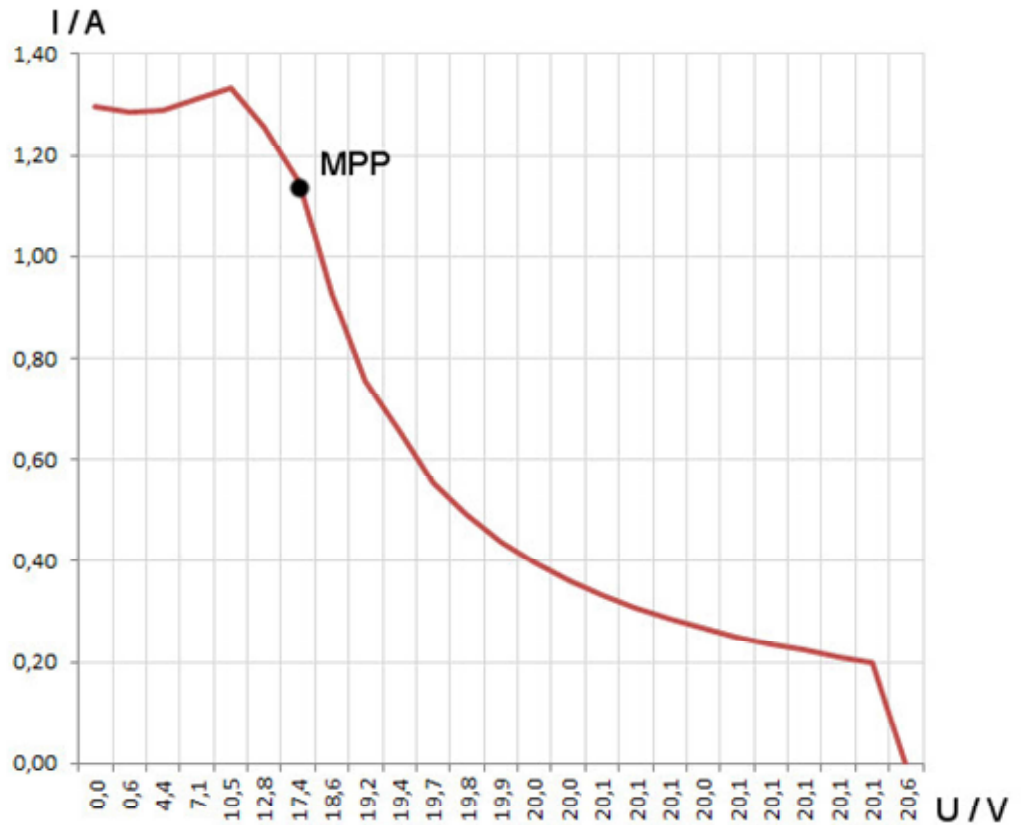


Abbildung 29: Solarkennlinie Modul Fa. Conrad, Sonnenlicht

Folgende Kennwerte konnten ermittelt werden:

$$U_{oc} = 20,608 \text{ V}$$

$$I_{sc} = 1,296 \text{ A}$$

$$MPP = U_{MPP} \cdot I_{MPP} = 17,379 \text{ V} \cdot 1,148 \text{ A} = 19,949 \text{ W}$$

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = 0,747$$

Die folgende Kennlinie zeigt das Solarmodul der Firma Conrad unter Bestrahlung mit dem Halogenstrahler:

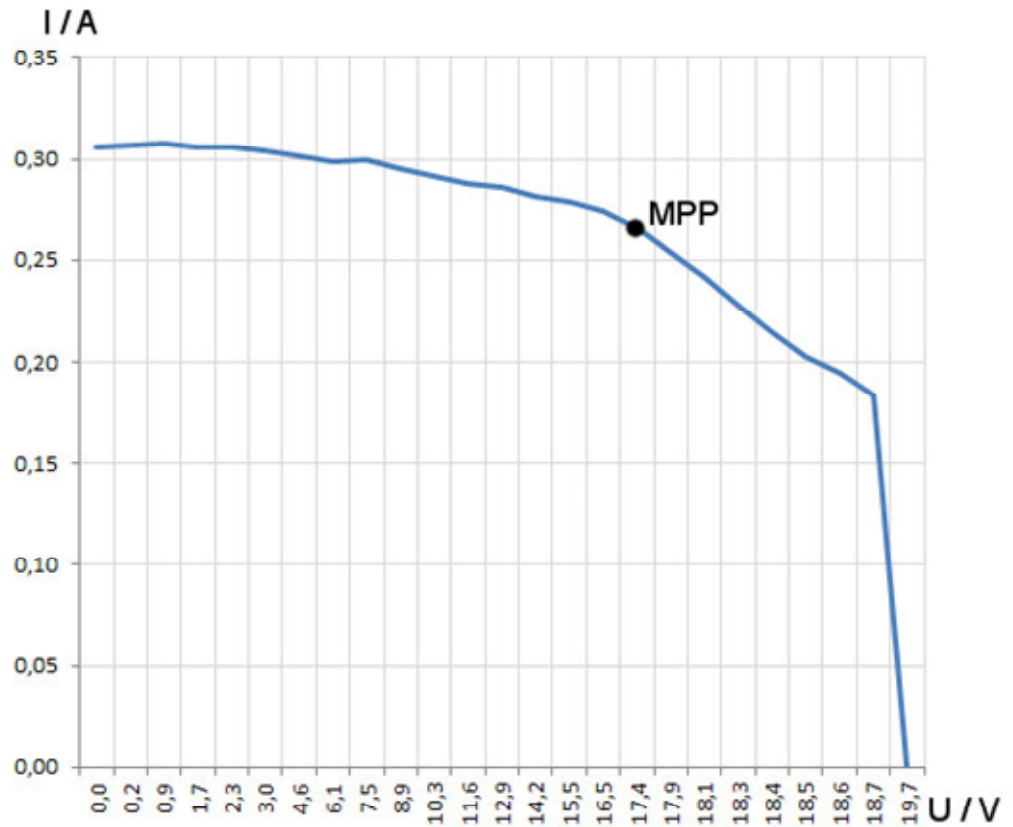


Abbildung 30: Solarkennlinie Modul Fa. Conrad, Halogenstrahler

Folgende Kennwerte konnten ermittelt werden:

$$U_{oc} = 19,695 \text{ V}$$

$$I_{sc} = 0,306 \text{ A}$$

$$MPP = U_{MPP} \cdot I_{MPP} = 17,417 \text{ V} \cdot 0,266 \text{ A} = 4,635 \text{ W}$$

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = 0,769$$

Man sieht somit, dass das Solarmodul aus dem Bestand der Hochschule nur eine geringe Leistung bei Sonneneinstrahlung erzielt. Unter Bestrahlung mit der Halogenlampe verringert sich diese um 61%, sodass im optimalen Arbeitspunkt nur 2,45 W zur Verfügung stehen.

Das Solarmodul der Firma Conrad verhält sich ähnlich. Unter Sonneneinstrahlung stimmen die Werte des Datenblattes mit den gemessenen Werten überein. Bei Bestrahlung mit der Halogenlampe sind nur noch 23% dieser Leistung vorhanden, sodass unter Laborbedingungen im optimalen Fall 4,6W erzielt werden können.

Es wird für den Versuch daher das Solarmodul der Firma Conrad gewählt, einerseits, da es sich günstig beschaffen lässt, andererseits, da es eine ausreichende Leistung unter Laborbedingungen erzielt.

Zudem ist festzuhalten, dass die Solarmodule nur einen Bruchteil ihrer Nennleistung unter Laborbedingungen erzielen können.

## 4.2 Der Generator

Ziel ist es mit dem Generator eine Windenergieanlage zu simulieren. Für den in dieser Arbeit durchgeführten Prototypaufbau eines Modellversuches wurde daher eine Bedienung „per Hand“ vorgesehen. Dies bedeutet, dass es möglich sein soll möglichst viel Leistung mit der Hand zu kurbeln.

Wieder wurde versucht kostengünstig auf sich in der Hochschule im Bestand befindliche Geräte zurückzugreifen. Das größte Problem dabei ist, dass der Versuch ohne berührungsempfindliche Spannungen auskommen muss und möglichst einfach zu halten ist.

Die vorliegenden Generatoren waren meist Asynchronmaschinen mit hohen Drehzahlen die einen Dreiphasen Wechselstrom erzeugen. Die erzeugten Spannungen wären zu hoch und die Drehzahlen wären im Handbetrieb ohne aufwändige Übersetzung oder ein Getriebe nicht zu erreichen. Zudem hätte eine Gleichrichtung der Spannung erfolgen müssen.

Daher fiel die Wahl auf einen permanenterregten Gleichstromgenerator als „Langsamläufer“. Diese Generatoren erzeugen eine Gleichspannung, es ist somit kein Gleichrichter mehr nötig. Zudem sind die Nenndrehzahlen eines „Langsamläufers“ mit geringem Aufwand zu erreichen, somit kann mit der Nennspannung gearbeitet werden.

Ein passender Generatorsatz führt die Firma Aerocatcher im Programm. Dieser ist als 300W Gleichstromgenerator Langsamläufer ausgeführt und mit einer riemengetriebenen Übersetzungseinheit versehen, dessen Riemenscheibe am Generator einen Durchmesser von 20mm und die Riemenscheibe an der Stahlwelle 150mm aufweist.

Somit ergibt sich eine Übersetzung für die Kurbel von

$$\ddot{u} = \frac{150\text{mm}}{20\text{mm}} = 7,5$$

Dies bedeutet für den Generator ein Übersetzungsverhältnis von 7,5:1



Abbildung 31: Permanent-erregter Gleichstromgenerator mit Übersetzung

Aus dem Datenblatt sind folgende Kennwerte zu entnehmen [15]:

reference	torque/N.m	speed/rpm	P-out/W	voltage/V	current/A	P-in/W	efficiency/%
No load	0.02	1015	2.13	36.14	0.55	19.88	10.69
Max efficiency	2.06	919	199.2	36.23	6.71	243.27	84.04
Rated load	3.06	876	280.59	36.28	9.45	342.92	81.82
Max torque	5.68	757	450.68	36.39	17.16	624.44	72.17

Abbildung 32: Ausschnitt Datenblatt Generator

Es ist zu sehen, dass sich durch die Übersetzung von  $7,5:1$  und einer angenommenen Drehzahl von  $100U/min$  der Generator in einem Bereich betreiben lässt, in der er einerseits seine Nennspannung erreicht und sich andererseits in der Nähe des Arbeitspunktes (*Max efficiency*) betreiben lässt.

Der Generator und die Übersetzungseinheit werden für den Prototypaufbau auf einer Holzplatte verschraubt und an die Stahlwelle eine eigens gefertigte Handkurbel mit einer Länge  $l=17cm$  montiert.

Durch zählen der erreichten Umdrehungen pro Minute im Leerlauf und unter Belastung an dem schon vorgestellten variablen Widerstand stellt sich der Wert von  $100U/min$  als realistisch heraus. Es werden zudem die erzeugten Spannungen und Ströme aufgenommen.



Es konnte dabei an  $R=30\ \Omega$  *kurzzeitig* eine elektrische Leistung von,

$$P_{max} = U \cdot I = 28,6V \cdot 1,3A = 37,1W$$

im Leerlauf und unter einer höheren Drehzahl konnte eine Spannung von,

$$U_{max} = 47,6V$$

sowie bei Belastung mit einem kleinen Widerstand ein maximaler Strom von

$$I_{max} = 2,8A$$

gemessen werden.

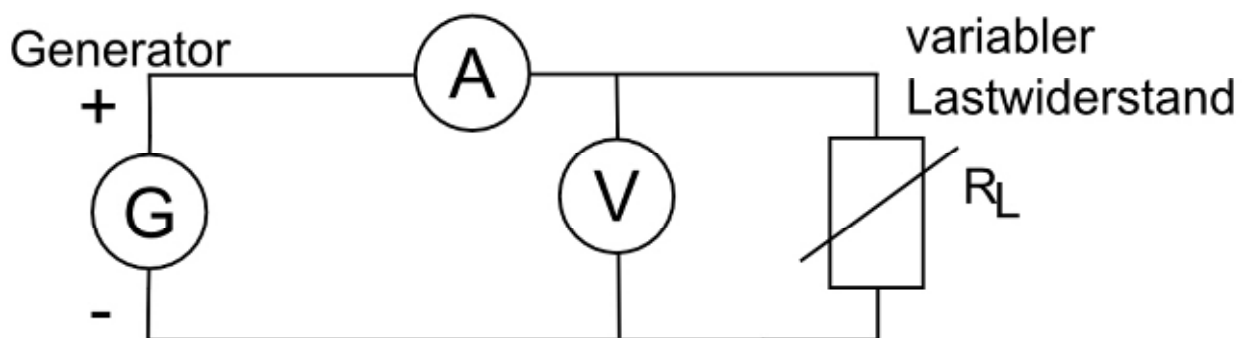


Abbildung 33: Testaufbau Generator

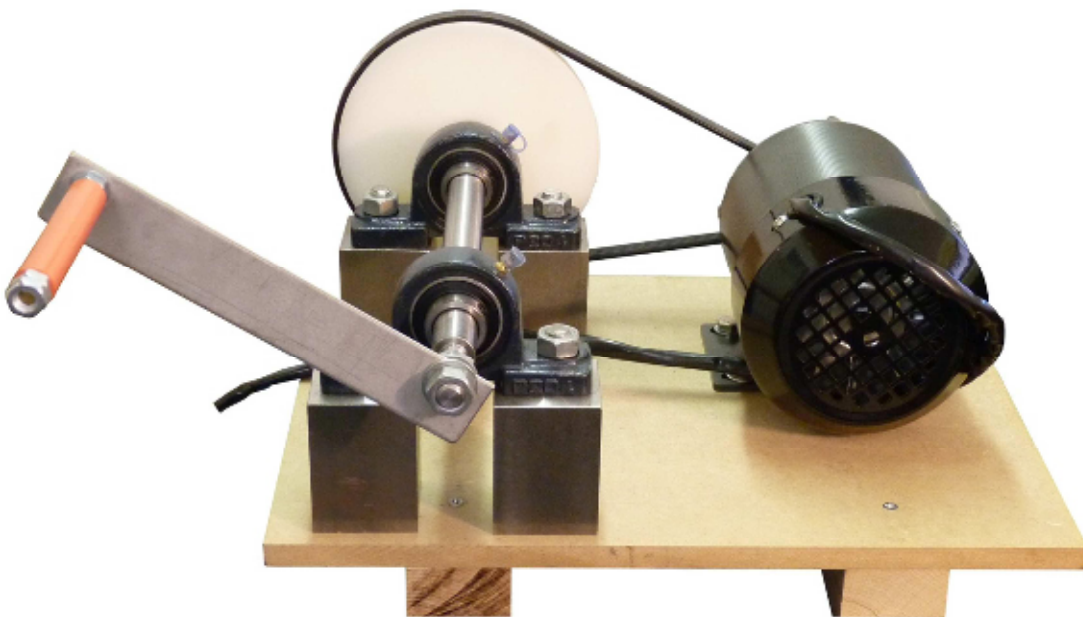


Abbildung 34: Aufbau Generator und Übersetzung

Es zeigt sich somit, dass bei einem Betrieb „per Hand“ nicht annähernd die Nennleistung des Generators von  $300W$  erreicht werden kann, da der Mensch nicht die erforderliche Muskelkraft und Ausdauer in den Armen besitzt, dennoch sind die  $37,1W$  als Kurzzeitleistung im Vergleich zu der von dem Solarmodul erzeugten Leistung von  $4,6W$  ein sehr guter Wert, weshalb sich der Aufbau als erfolgreich bezeichnen lässt.

### 4.3 Der Energiespeicher – die Batterie

In dem Modellversuch soll ein Inselsystem nachgestellt werden, eine Wichtige Bedeutung kommt dabei dem Energiespeicher zu gute. Er soll die erzeugte Leistung puffern, wenn kein Verbraucher diese abnimmt und zusätzliche Energie liefern, wenn mehr als die von den Energiequellen erzeugte Leistung gefordert wird.

Es lässt sich eine große Auswahl an Batterien unterschiedlichster Technologien finden. Populäre Akkutechnologien sind zum Beispiel: Blei, Lithium-Ionen, Lithium-Polymer, Nickel-Eisen, Nickel-Cadmium und Nickel-Metallhydrid.

In einem realen Aufbau werden allerdings hauptsächlich Blei-Akkumulatoren verwendet, denn diese sind kostengünstig in der Herstellung und besitzen eine relativ lange Lebensdauer, selbst bei vielen Ladezyklen. Zudem ist für einen Stationären Aufbau deren hohes Gewicht von geringer Bedeutung.

Bleiakkumulatoren lassen sich ohne komplizierte Ladetechnologien laden, die einfachste Methode ist das Konstantspannungsverfahren. Dabei wird ein mit 12V klassifizierter Akku mit einer konstanten Spannung von 13,8V aufgeladen. Dies ist gleichzeitig die Ladeschlussspannung. Der Ladestrom sinkt dabei kontinuierlich aufgrund der kleiner werdenden Spannungsdifferenz zwischen Akku und Ladeschaltung. Es bedarf daher keiner zusätzlichen Stromüberwachung.

Die untere Spannungsgrenze liegt bei 10,8V, wenn diese Spannung unterschritten wird, so wird der Akku tiefenendladen und kann beschädigt werden. Diese beiden Spannungen sind für die eingesetzte Spannungsüberwachung von Relevanz.

Für den Versuch wurde sich für einen 12V, 2.0 Ah Blei-Gel-Akku der Firma Sonnenschein entschieden. Dieser ist wartungsfrei und besitzt keine Flüssigkeiten die austreten könnten und jemanden im Laborversuch verletzen könnte. Auch ist dadurch der Transport unkompliziert, da ein versehentliches „über Kopf halten“ zu keinem Flüssigkeitsaustritt führt. Die geringe Selbstentladung des Akkus garantiert eine Einsatzbereitschaft auch länger nicht benutzter Versuchsaufbauten.



Abbildung 35: Blei-Gel-Akkumulator

Die aus dem Datenblatt (siehe Anhang) entnommenen Kenndaten lauten:

$$\begin{aligned} \text{Nennspannung } U_{Nenn} &= 12,0 \text{ V} \\ \text{Nennkapazität } C_{Nenn} &= 2,0 \text{ Ah} \\ \text{Maximale Belastung } I_{max} &= 40,0 \text{ A} \\ \text{Kurzschlussstrom } I_{sc} &= 73,0 \text{ A} \\ \text{Innenwiderstand } R_i &= 172 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

## 4.4 Der Abwärtswandler

Es ist zu sehen, dass von den beiden Energiequellen unterschiedliche Spannungen und Ströme zur Verfügung gestellt werden:

$$U_{Solar\ max} = 19,7V$$

$$I_{Solar\ max} = 0,3A$$

$$U_{Wind\ max} = 47,6V$$

$$I_{Wind\ max} = 2,8A$$

Diese Werte stellen somit die Eckdaten für die Auswahl des Abwärtswandlers dar. Als Ausgangsspannung sollte eine einstellbare Spannung im Bereich von 12V bis 14V verfügbar sein. Da der Prototypenaufbau auf eine Lochrasterplatine per Hand gelötet werden soll, können keine SMD Bauelemente verwendet werden.

Nach einiger Recherche fällt die Wahl auf den Abwärtswandler *LM2576HV-ADJ* der Firma *Texas Instruments*.

Dieser bietet eine maximale Eingangsspannung von  $U_{in} = 63V$  und eine durch einen Widerstandsteiler einstellbare Ausgangsspannung. Zudem zeichnet sich die Schaltung durch einen sehr geringen Bauteilumfang aus, was einer späteren Kleinserienfertigung sehr entgegen kommt.

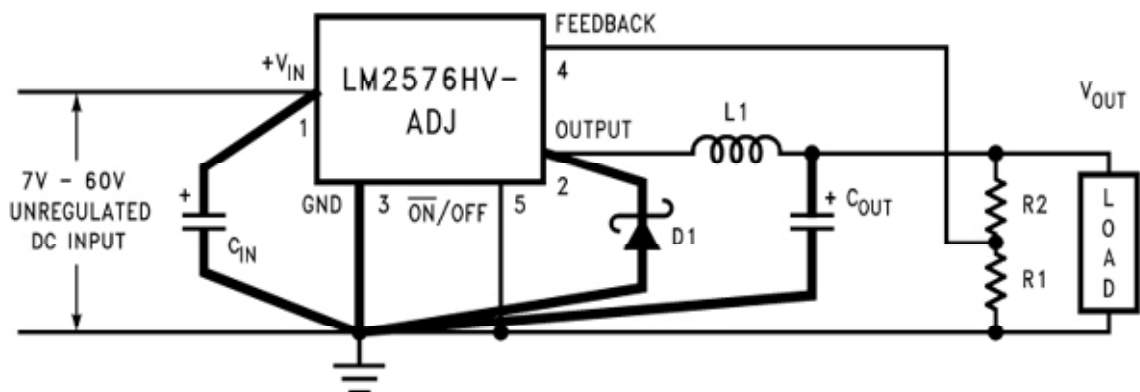


Abbildung 36: Schaltbild Abwärtswandler

Die Abbildung 36 [16] zeigt das aus dem Datenblatt entnommene Schaltbild des Standardaufbaus. Dieser wird auch in der späteren Ladereglerschaltung Verwendung finden.

Es sollen zwei dieser Abwärtswandler parallel eingesetzt werden, je einer für die Solarzelle und den Generator. Da sich deren ermittelte Spannungen und Ströme deutlich unterscheiden, muss dies bei der Auswahl der Kondensatoren, Induktivitäten und Dioden berücksichtigt werden.

Zuerst werden die Widerstände für den Widerstandsteiler der Ausgangsspannung berechnet. Aus dem Datenblatt ist folgende Formel zu entnehmen:

$$V_{Out} = V_{Ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Die Gleichung wird nach  $R_2$  aufgelöst.

$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{V_{Out}}{V_{Ref}} - 1\right)$$

Der Widerstand  $R_1$  wird mit  $1k\Omega$  gewählt und die Spannung  $V_{Ref}=1,23V$  aus dem Datenblatt entnommen. Die Ausgangsspannung der Anordnung soll  $V_{Out}=13,8V$  betragen, somit erhält man für den Wert für  $R_2$ :

$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{V_{Out}}{V_{Ref}} - 1\right) = 1k\Omega \cdot \left(\frac{13,8V}{1,23V} - 1\right)$$

$$R_2 = 10,22k\Omega$$

Es Folgt die Auswahl der Induktivität L1:

Dazu wird zuerst der Wert für die Volt \* Millisekunden Konstante  $E \cdot T$  mittels folgender Formel berechnet:

$$E \cdot T = (V_{in} - V_{out}) \cdot \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot \frac{1000}{f(\text{in kHz})}$$

Die Schaltfrequenz F der Abwärtswandlerschaltung beträgt  $f=52kHz$ .

Man sieht, dass die Formel einen Wert für die Eingangsspannung enthält, somit muss die Berechnung getrennt ausgeführt werden.

Für die Solarseite:

$$E \cdot T = (17,6V - 13,8V) \cdot \frac{13,8V}{17,6V} \cdot \frac{1000}{52}$$

$$E \cdot T = 57,3$$

Für die Generatorseite:

$$E \cdot T = (47,6 - 13,8V) \cdot \frac{13,8V}{47,6V} \cdot \frac{1000}{52}$$

$$E \cdot T = 188,4$$

Mit diesen Werten sind aus *Figure 27* und *Table 2* des Datenblattes die Werte für die jeweilige Induktivität beim größten verfügbaren Ausgangsstrom zu entnehmen.

Somit folgt:

$$L_{Solar} = 100\mu H$$
$$L_{Generator} = 220\mu H$$

Für die Ein- und Ausgangskondensatoren, sowie die Diode werden folgende Werte entnommen:

$$C_{out} = 680\mu F$$
$$C_{in} = 100\mu F$$
$$D_1 = 10A, 25V$$

Somit sind alle Bauteile für den Abwärtswandler bekannt.

## 4.5 Die Spannungsüberwachung

Ein wichtiger Bestandteil eines Ladereglers ist die Spannungsüberwachung. Sie stellt sicher, dass der Akkumulator in seinen Betriebsgrenzen betrieben wird, das bedeutet, dass die Ladeschlussspannung von 13,8V nicht überschritten wird, da es sonst zu einer Ausgasung der Zellen kommt. Weiterhin darf eine Spannung von 10,8V nicht unterschritten werden, da der Bleiakkumulator dann tiefenentladen wird, was zu physikalischen Beschädigungen führen kann.

Folgende Betriebsgrenzen des Akkumulators sind daher:

$$U_{max} = 13,8V$$

$$U_{min} = 10,8V$$

Für diesen Einsatzzweck ist der Baustein *ICL7665* der Firma *Maxim Integrated* hervorragend geeignet. Er ist eine mikroprozessorgesteuerte Spannungsüberwachungsschaltung mit zwei unabhängigen Kanälen zur Erfassung von Über- und Unterspannungen. Die Bauform ist DIP-8 und somit für Montage auf einer Lochrasterplatine geeignet.

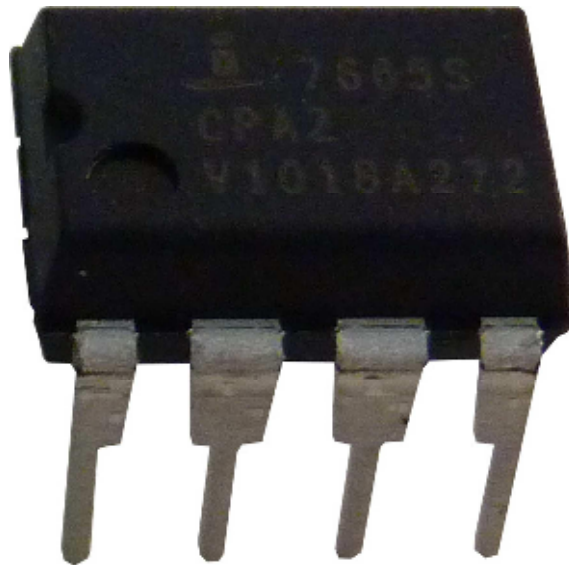


Abbildung 37: ICL7665, DIP-8

Die Bestückung der Schaltung wird aus dem Datenblatt [17] unter *Figure 15* entnommen. Es wird eine Schaltung mit Hysterese Funktion gewählt, das bedeutet, dass wenn die Eingangsspannung  $V_{in}$  eine gewählte Spannungsgrenze  $V_u$  erreicht, ein angeschlossener Transistor geschaltet wird und die Spannungsversorgung unterbricht. Sinkt die Eingangsspannung unter eine Spannung  $V_L$ , so wird der Transistor ausgeschaltet und die Spannungsversorgung freigegeben. Dies wird in Abbildung 39 verdeutlicht.



Folgende Grafik beschreibt die gewählte Schaltung

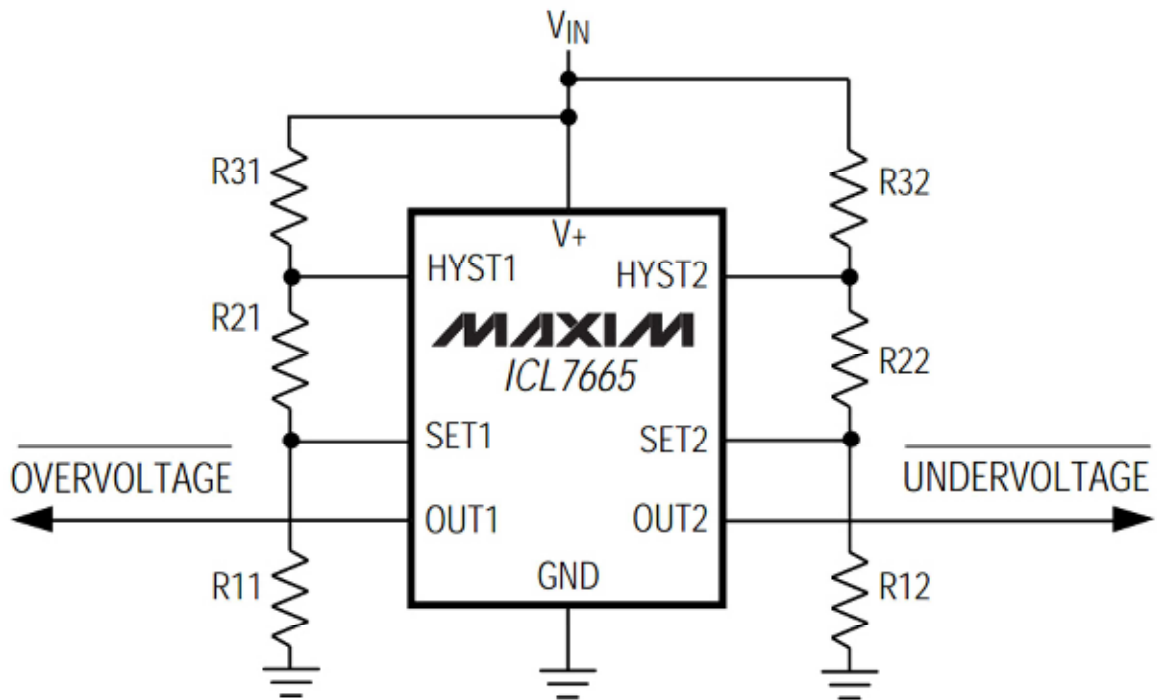


Abbildung 38: Schaltung Spannungsüberwachung

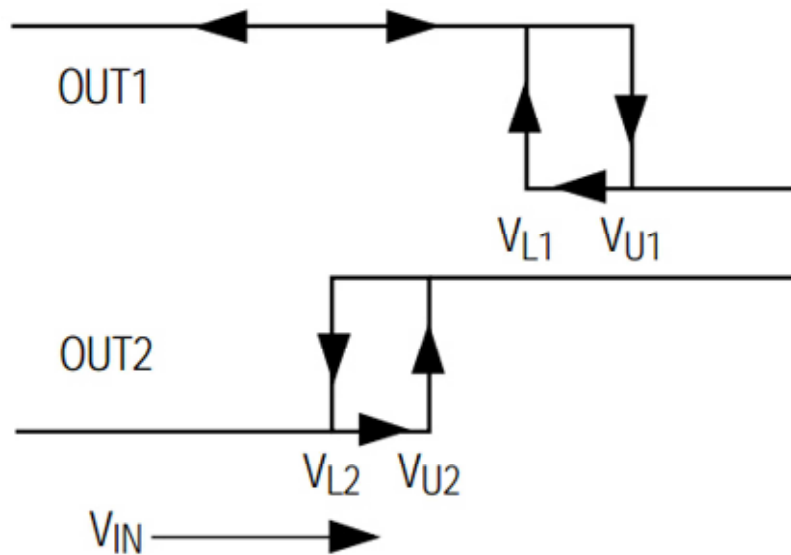


Abbildung 39: Hystereseffekt

Es werden folgende Spannungsgrenzen gewählt:

$$V_{U1} = 12,0V$$

$$V_{L1} = 10,8V$$

$$V_{U2} = 13,8V$$

$$V_{L2} = 13,0V$$

An dem Ausgang *OUT1* ist die Beschaltung mit einem P-Kanal MOSFET zum Schalten eines Verbrauchers gegen Plus vorgesehen, *OUT2* wird hingegen mit einem N-Kanal MOSFET beschaltet, dieser soll gegen Masse schalten. Dieses wird später im Aufbau der Ladereglerhaltung näher behandelt.

Es folgt die Berechnung der Widerstände analog zu den im Datenblatt angegebenen Formeln.

Unterspannungsabschaltung:

$$V_{L1} = 10,8V$$

$$V_{U1} = 12,0V$$

$$V_{SET} = 1,3V$$

$$R_{11} = 10k\Omega$$

$$R_{21} = R_{11} \cdot \left( \frac{V_{L1} - V_{SET}}{V_{SET}} \right)$$

$$R_{21} = 74,6k\Omega$$

$$R_{31} = R_{11} \cdot \left( \frac{V_{U1} - V_{L1}}{V_{SET}} \right)$$

$$R_{31} = 9,2k\Omega$$

Überspannungsabschaltung:

$$V_{L2} = 13,0V$$

$$V_{U2} = 13,8V$$

$$V_{SET} = 1,3V$$

$$R_{12} = 10k\Omega$$

$$R_{22} = R_{12} \cdot \left( \frac{V_{L2} - V_{SET}}{V_{SET}} \right)$$

$$R_{22} = 90,0k\Omega$$

$$R_{32} = R_{12} \cdot \left( \frac{V_{U2} - V_{L2}}{V_{SET}} \right)$$

$$R_{32} = 6,2k\Omega$$

## 4.6 Der Verbraucher

Damit eine Inselanlage simuliert werden kann, muss es angeschlossene Verbraucher geben, die die im Akkumulator gespeicherte Energie verbrauchen können. In der Realität sind dies übliche Haushaltsgeräte, die über einen Wechselrichter an die 12V Nennspannung angeschlossen werden.

Da die Batteriekapazität sehr gering gewählt wurde um einen Laborversuch nicht zu lange dauern zu lassen und um die Kosten nicht unnötig zu erhöhen, wird auf eine Wechselrichterschaltung oder einen gekauften Wechselrichter verzichtet.

Stattdessen wird sich für eine rein ohmsche Last in Form von 12V Glühbirnen entschieden. Dadurch treten keine Rückströme oder ein Speicherverhalten wie bei Verbrauchern mit induktiven oder kapazitiven Verhalten auf. Dies dient der Einfachheit des Versuches und schließt somit unnötige Fehlerquellen aus.

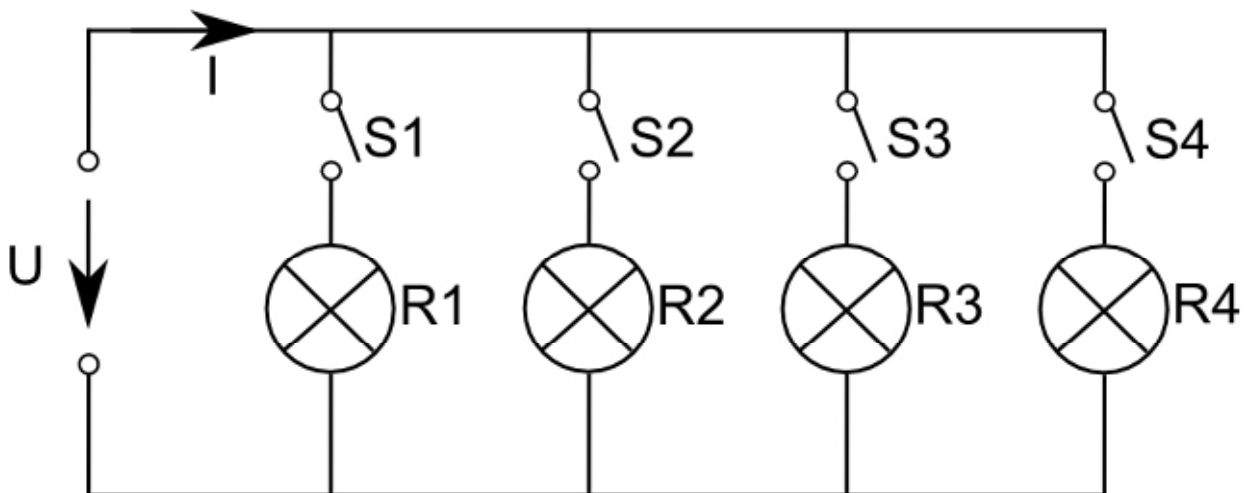


Abbildung 40: Schaltbild Verbraucher

Als Verbraucher  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  und  $R_4$  werden in Form von Glühbirnen des Typs  $GK12V10W / R10W / E4 / 2HP$  und  $GK12V21W / P21W / E4 / 2HR$  eingesetzt, dabei sind  $R_1$  und  $R_2$  10W Glühbirnen, und  $R_3$  und  $R_4$  21W Glühbirnen. Diese sind für den Sockel BA15S geeignet.

Dieser Sockel ist sehr weit verbreitet und auch in der Automobilbeleuchtung zu finden. Die Ersatzteilversorgung ist somit auf lange Zeit bei einem günstigen Preis gewährleistet.

Zudem handelt es sich um einen Bajonettverschluss, weshalb ein schnelles Wechseln von Lampen im Falle eines Defektes oder die Wahl einer größeren Last einfach zu realisieren ist.



Abbildung 41: Lampensockel BA15S

Mit den Schaltern *S1* bis *S4* können die Glühlampen separat ein- und ausgeschaltet werden, es lassen sich so folgende theoretische Minimal- und Maximalströme erzeugen:

$$I_{min} = \frac{P_{min}}{U_N}$$

$$I_{min} = \frac{10W}{12V} = 0,833A$$

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{U_N}$$

$$I_{max} = \frac{10W + 10W + 21W + 21W}{12V} = 5,167A$$

Der Verbraucher aufgrund der Platzverhältnisse zusammen mit der Batterie in einem Gehäuse verbaut. Die Kontakte sind mit Sicherheitsbuchsen nach Außen geführt.



Abbildung 42: Verbraucher Aufbau

## 4.7 Aufbau der Ladereglerschaltung

Die Erkenntnisse aus den Grundlagen und der Bauteileauswahl fließen nun in den Aufbau der Ladereglerschaltung ein. Das Prinzip des hybriden Ladereglers beruht auf der Eigenschaft zwei verschiedene Stromerzeuger mit unterschiedlichen Spannungen, Ströme und damit auch Leistungen auf ein einheitliches Spannungsniveau zu transformieren und damit zu vereinen.

Damit gemeint ist die Theorie der Parallelschaltung von Spannungsquellen. Es werden dazu die beiden Abwärtswandler parallel aufgebaut und an ihrem Ausgang liegt folgend der Berechnung eine Spannung von  $U=13,8V$  an. Diese haben nun denselben Betrag, dasselbe Vorzeichen und sind an demselben Punkt geerdet und lassen sich somit parallelschalten. Die Ströme der beiden Quellen werden nun addiert und es sollte kein unerwünschter Stromfluss zwischen den beiden Schaltungen entstehen. Zusätzlich wird die Schaltung mit Dioden am Ausgang versehen, um dies zu verhindern.

Der Akkumulator ist zudem mit der resultierenden Schaltung parallel geschaltet und kann dadurch geladen werden. Diese Spannung wird von der Spannungsüberwachung beobachtet und der ebenfalls parallel liegende Verbraucher kann über einen MOSFET ein- und ausgeschaltet werden.

Die Eingänge des Ladereglers sind über Glassockelsicherungen abgesichert und somit geschützt.

Sollte es zu einem Defekt an einem Bauteil kommen und die Ausgangsspannung steigt wider Erwarten über einen Wert von  $U_{max}=13,8V$ , so wird durch die Spannungsüberwachung mittels zweier MOSFETs die Solarzelle kurzgeschlossen und der Generator an einen Lastwiderstand mit den Kennwerten  $R_L=47\Omega$ ,  $P_L=50W$  angeschlossen. Somit wird in einem Fehlerfall ein weiteres Zerstören der Schaltung verhindert.

Die LEDs *GEN* und *PV* zeigen die benutzten Eingänge an. Eine weitere LED mit der Bezeichnung *SPG OK* erleuchtet, sobald die Spannung am Ausgang über  $10,8V$  gestiegen ist.

Die Spannungsüberwachung lässt sich über einen Kippschalter überbrücken, sodass sich testweise ein Betrieb ohne diesen realisieren lässt. Dies ist insbesondere bei einem Weglassen der Batterie hilfreich.

Die folgende Abbildung zeigt den fertigen Schaltplan.

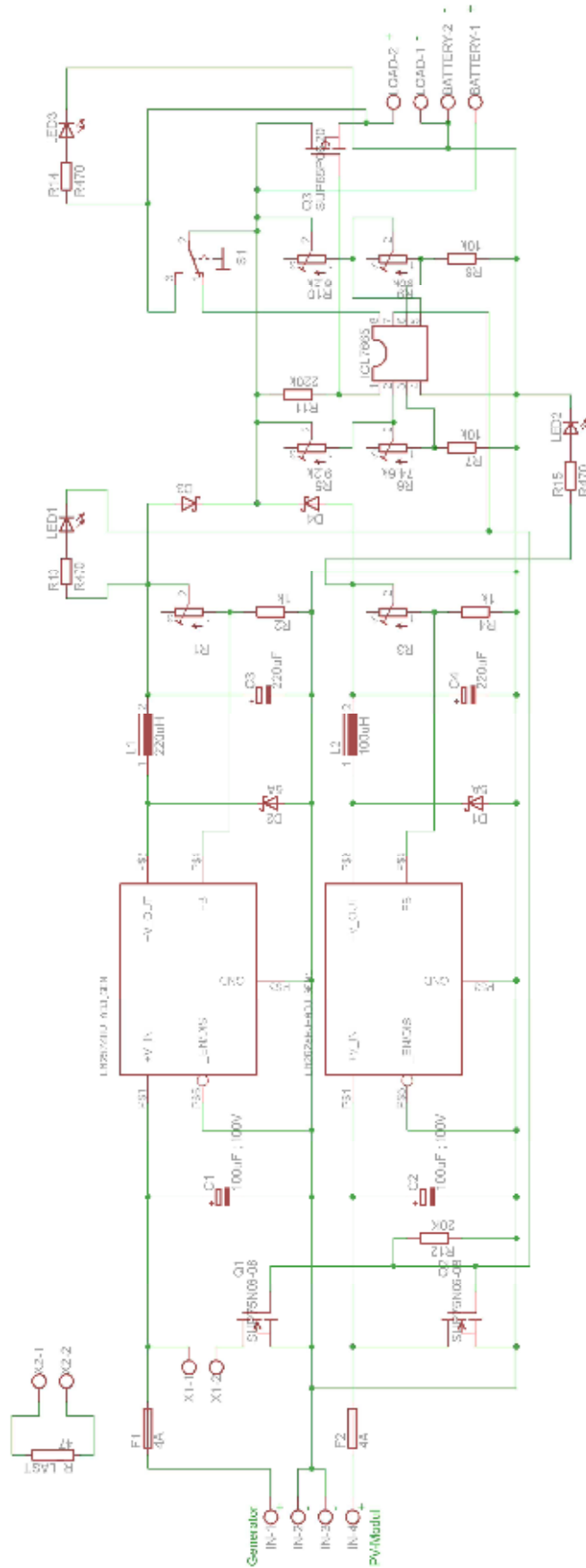


Abbildung 43: Schaltplan Laderegler

Da es sich bei der Aufgabe um einen Prototypenentwurf handelt, wurde die Schaltung per Hand auf eine Standard Lochrasterplatine des Formates  $100\text{mm} \times 160\text{mm}$  gelötet. Das Ergebnis sieht folgendermaßen aus:

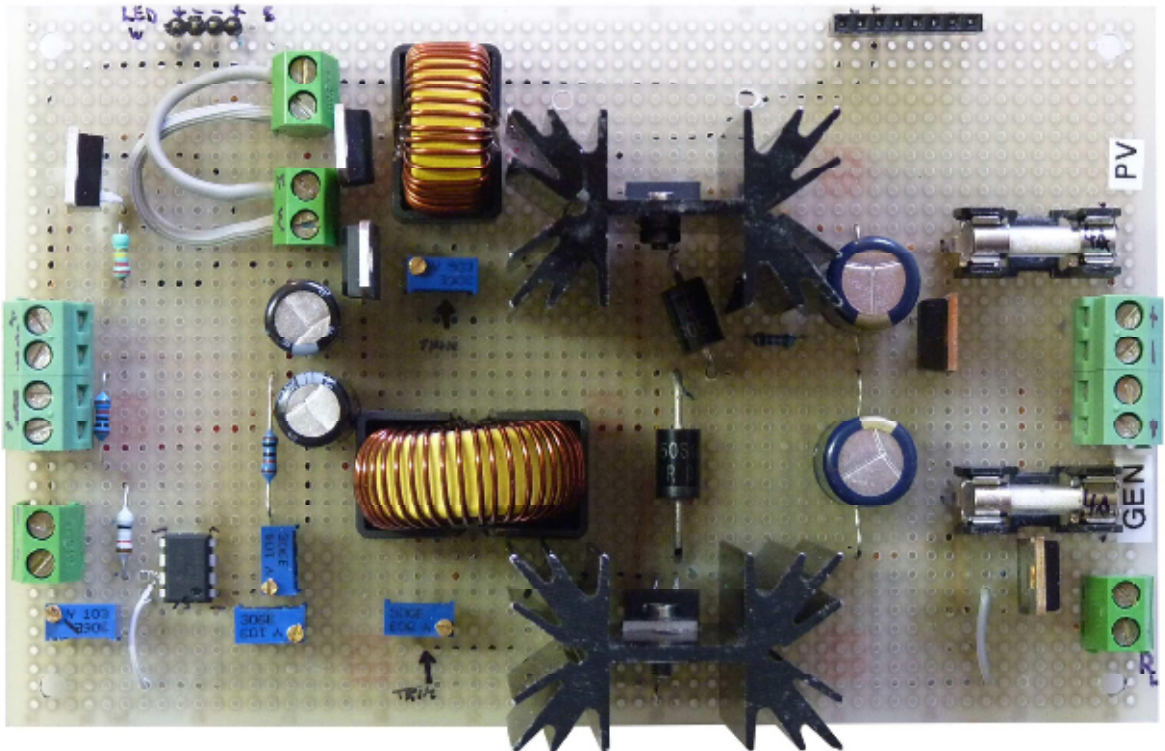


Abbildung 44: Schaltung Oberseite

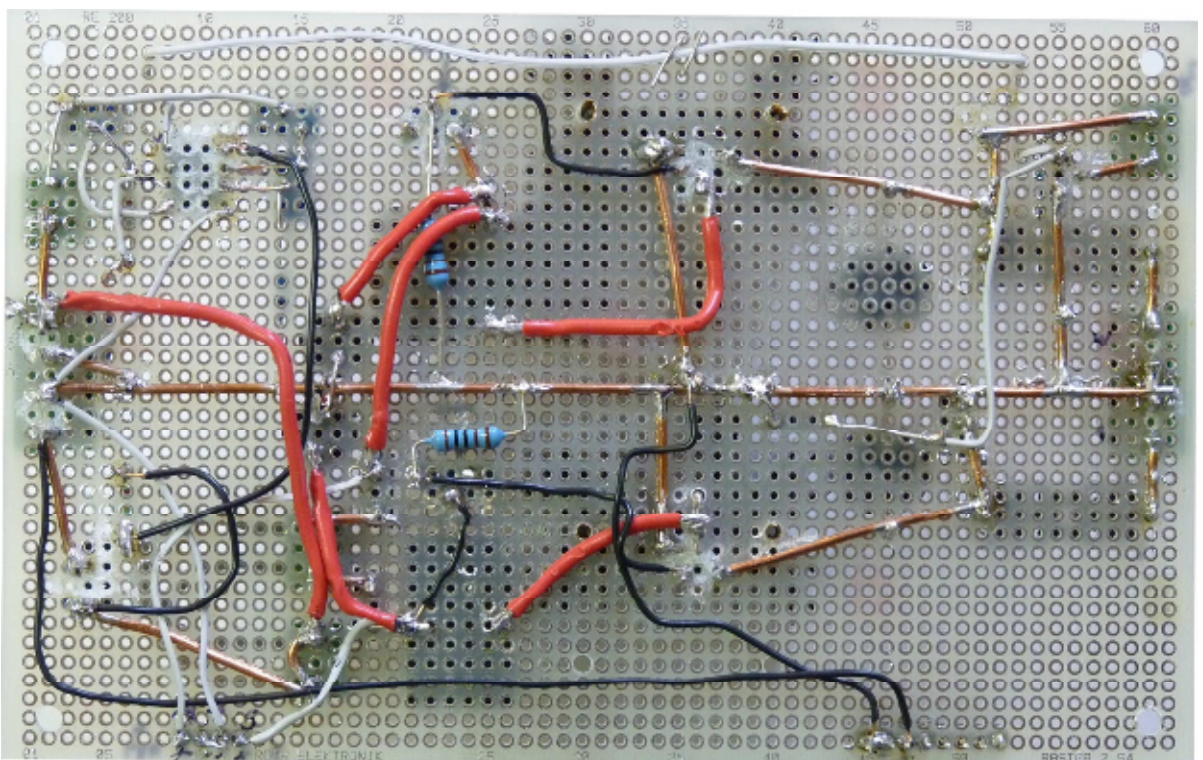


Abbildung 45: Schaltung Unterseite

Mittels der als *Trim* bezeichneten Feinpotentiometer lässt sich die Ausgangsspannung der Abwärtsrichter justieren.

Der Aufbau wurde in einem Gehäuse verbaut, alle wichtigen Kontakte nach außen geführt und eine Beschriftung aufgebracht.

Es zeigt sich folgendes Endergebnis:



Abbildung 46: Fertiger Hybrid Laderegler



## 5. Erprobung des Ladereglers

Alle benötigten Komponenten sind nun beschafft und zusammengebaut worden und der Modellversuch kann wie in Abbildung 18 beschrieben aufgebaut werden. Im Folgenden werden Testreihen durchgeführt um die Belastung und Funktion des Aufbaus zu prüfen und um eine Abschließende Bewertung durchführen zu können.

Es wird nun versucht die ungeladene Batterie (Anfangsspannung  $U=10,8V$ ) mit dem Generator zu laden. Bei diesen Voraussetzungen kann der höchste Ladestrom erzielt werden und stellt damit die größte Belastung für die Schaltung und den Generator dar. Es konnte ein maximaler Ladestrom

$$I_{GenMax} = 2,53A \text{ bei } U_N = 13,8V$$

erzielt werden.

Nun wird der gleiche Versuch mit der Solarzelle durchgeführt. Der Halogenstrahler besitzt dabei eine Entfernung von  $d=30cm$  und Solarzelle wird vollständig beleuchtet. Es lässt sich ein Ladestrom von

$$I_{SolarMax} = 0,27A \text{ bei } U_N = 13,8V$$

messen.



Abbildung 47: Aufbau Halogenstrahler und Solarzelle

Kombiniert man nun beide Eingänge, d.h. es wird die die Solarzelle Bestrahlt und am Generator per Hand Energie umgewandelt, so zeigen sich folgende Werte:

$$I_{GesamtMax} = 2,76A \text{ bei } U_N = 13,8V$$

Man sieht somit, dass die Ströme der Energieerzeuger addiert werden, somit wird die Theorie der Parallelschaltung von Spannungsquellen erfüllt und der Aufbau erweist sich als funktionstüchtig.

Es soll zudem eine Wirkungsgradmessung durchgeführt werden um die Effizienz der Schaltung zu bestimmen. Dazu wird statt der Batterie der schon bekannte variable Lastwiderstand an der Schaltung angeschlossen und es werden die Ein- und Ausgangsspannungen und –Ströme bei unterschiedlichen Widerstandswerten gemessen. Dadurch lässt sich die zugeführte und abgegebene Leistung bestimmen und somit auch der Wirkungsgrad.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

Die Messung wird getrennt nach den Quellen durchgeführt, damit die einzelnen Schaltungsteile beurteilt werden können.

Durch die Last wird so gewählt, dass sie der erzeugten Leistung im Normalbetrieb entspricht, somit lässt sich ein Arbeitspunkt einstellen. Für die Solarzelle wird eine Last von  $P=3W$  eingestellt und zusätzliche eine Vergleichsmessung durchgeführt.

Für den Generator wird ein Arbeitspunkt von  $P=25W$  angenommen und auch eine Vergleichsmessung bei geringerer Last durchgeführt.

$R_L / \Omega$	$U_{in} / V$	$I_{in} / A$	$P_{in} / W$	$U_{out} / V$	$I_{out} / A$	$P_{out} / W$	$\eta$
63,48	19,52	0,22	4,20	13,42	0,21	2,85	0,68
100,00	19,68	0,15	2,98	13,58	0,13	1,83	0,61

Tabelle 1: Wirkungsgradmessung Laderegler Solar

$R_L / \Omega$	$U_{in} / V$	$I_{in} / A$	$P_{in} / W$	$U_{out} / V$	$I_{out} / A$	$P_{out} / W$	$\eta$
10,00	34,56	0,72	24,88	13,80	1,28	17,67	0,71
50,00	36,32	0,16	5,96	13,80	0,26	3,59	0,60

Tabelle 2: Wirkungsgradmessung Laderegler Generator

Der Wirkungsgrad der Schaltung beträgt somit

$$\eta = 60\% \text{ bis } 70\%$$

Für den gewählten Arbeitspunkt sind Wirkungsgrade von

$$\eta_{Solar} = 68\%$$
$$\eta_{Generator} = 71\%$$

erreicht worden.

Man sieht, dass sich bei steigender Belastung der Wirkungsgrad erhöht. Im Datenblatt zu dem Abwärtsrichter ist ein Wirkungsgrad von  $\eta = 77\%$  für einen ähnlichen Aufbau, allerdings mit geringeren Spannungen angegeben. Dies soll als Vergleich dienen es ist zu erkennen, dass der Laderegler durchaus ähnliche Werte erreicht.

Die Spannungsüberwachung wird durch einen Entladeversuch mittels des Verbrauchers überprüft und kann damit verifiziert werden.

## 6. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit wurde mit dem Ziel durchgeführt, einen Modellversuch für eine hybride Energieversorgung zu entwickeln. Es zeigte sich, dass der Laderegler die bedeutendste Komponente in diesem Aufbau ist und deren Entwicklung den größten Zeitaufwand veranschlagte. Da es sich um einen per Hand gefertigten Prototyp handelt, gibt es noch viele Punkte die verbessert werden können. Ein Schritt für Schritt erfolgreicher Aufbau auf Lochrasterplatine erweist sich im Nachhinein als sehr undurchsichtig und die Fertigungsqualität der gelöteten Komponenten und den Verbindungen untereinander kann deutlich verbessert werden. Es ist daher anzuraten einen Folgeaufbau mittels des in EAGLE gezeichneten Schaltbildes ein Platinenlayout zu entwickeln und diese extern fertigen zu lassen. Dadurch kann die physikalische Größe des Ladereglers weiter reduziert werden.

Der Aufbau zeigt zudem sehr deutlich, dass Photovoltaikanlagen im Vergleich zu Windgeneratoren nur eine sehr geringe Leistung aufweisen. Dies kann als Erkenntnisgewinn in die Schülerversuche übernommen werden.

Ein per Hand zu bedienender Generator erweist sich zudem als sehr ermüdend zu bedienen, ein längerfristiges Erzeugen von Leistung ist nur unter großer Kraftanstrengung und Belastung der Ausdauer möglich. Ein Ausweg wäre die Nutzung eines an einem Fahrrad oder Ergometer angeschlossenen Generators, welcher auch über einen längeren Zeitraum zu bedienen wäre.

## Literaturverzeichnis

- [1] Link vom 29.09.2013: <http://solaranlagekuehren.de/assets/images/Solarzelle.gif>
- [2] Photovoltaische Anlagen, Haselhuhn, Hartmann, DGS-Deutsche Gesellschaft für Solarenergie 03/2005
- [3] Planung von Photovoltaik-Anlagen, Frank Konrad, Vieweg Verlag, 1. Auflage, 2007
- [4] Link vom 29.09.2013: <http://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/archiv-2012/2012/kw09/united-solar-liefert-345-mw-duennschichtmodule-mit-fuer-zwei-photovoltaik-kraftwerke-in-suedkorea.html>
- [5] Link vom 29.09.2013: <http://www.solaranlagen-portal.com/solarmodule/systeme/vergleich>
- [6] Photovoltaik Engineering, Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner, Springer Verlag, 3. Erw. Auflage, 2010
- [7] Link vom 30.09.2013: [http://www.ifkp.tu-berlin.de/fileadmin/i1/Kneissl/IS08\\_Solarzellen\\_MF.pdf](http://www.ifkp.tu-berlin.de/fileadmin/i1/Kneissl/IS08_Solarzellen_MF.pdf)
- [8] Link vom 30.09.2013: <http://www.solartechnik-solaranlagen.de/lexikon/airmass.html>
- [9] Link vom 30.09.2013: <http://housecraft.ca/2012/09/30/the-diy-decorator%E2%80%99s-eco-friendly-lighting-dilemma/>
- [10] Elektrische Maschinen, Eckhard Spring, Springer Verlag, 3. Auflage
- [11] Elektrische Maschinen und Antriebe, Andreas Binder, Springer-Verlag Berlin 2012, (Grafik geändert)
- [12] Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik, Helmut Lindner, Harry Brauer, Constantin Lehmann, Fachbuchverlag Leipzig, 8. Auflage
- [13] Link vom 28.09.2013 [http://antriebstechnik.fh-stralsund.de/1024x768/Dokumentenframe/Kompendium/Fachvorlesungen/Aktorik\\_Antriebe/5\\_Elektromechanische\\_Energiewandler.pdf](http://antriebstechnik.fh-stralsund.de/1024x768/Dokumentenframe/Kompendium/Fachvorlesungen/Aktorik_Antriebe/5_Elektromechanische_Energiewandler.pdf)
- [14] Link vom 28.09.2013: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buck\\_converter.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buck_converter.svg)
- [15] Link vom 04.10.2013: <http://drmckay.lima-city.de/aerocatcher/GSG30300.pdf>

- [16] Link vom 04.10.2013: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576.pdf>
- [17] Link vom 04.10.2013: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/ICL7665.pdf>

# Anhang

Messwerte für die Aufnahme der I-U-Kennlinie:

R in Ohm	Conrad, draußen				Conrad, Strahlter				klein, draußen				klein, Strahlter			
	U in V	I in A	P in W	J in V	I in A	P in W	J in V	I in A	P in W	U in V	I in A	P in W	J in V	I in A	P in W	
1	0,0234	1,3961		0,0067	0,3060		0,0749	0,0050	0,4874		0,0002	0,1860		0,0002	0,1860	
1	0,6112	1,2840	0,7848	0,2440	0,3070	0,0749	0,0749	0,5250	0,4850	0,2546	0,1480	0,1860	0,0275	0,1480	0,1860	
2,5	4,3650	1,2873	5,6191	0,9000	0,3080	0,2772	0,2772	1,5049	0,4806	0,7233	0,5802	0,1863	0,1081	0,5802	0,1863	
5	7,0950	1,3100	9,2945	1,6710	0,3060	0,5113	0,5113	2,3880	0,4747	1,1336	1,0200	0,1867	0,1904	1,0200	0,1867	
7,5	10,4820	1,3328	13,9704	2,3400	0,3060	0,7160	0,7160	3,7430	0,4715	1,7649	1,4760	0,1866	0,2754	1,4760	0,1866	
10	12,8443	1,5770	16,1453	3,0100	0,3040	0,9150	0,9150	4,6330	0,4658	2,1571	1,8990	0,1870	0,3551	1,8990	0,1870	
15	17,3790	1,1479	19,9494	4,5660	0,3010	1,3714	1,3714	7,0220	0,4660	3,2723	2,8380	0,1870	0,5307	2,8380	0,1870	
20	18,5770	0,9277	17,2339	6,0800	0,2990	1,8179	1,8179	9,2420	0,4624	4,2735	3,7420	0,1869	0,6994	3,7420	0,1869	
25	19,1560	0,7576	14,5126	7,5410	0,2996	2,2593	2,2593	11,4880	0,4593	5,2764	4,7190	0,1868	0,8815	4,7190	0,1868	
30	19,4270	0,6540	12,7053	8,9460	0,2950	2,6391	2,6391	13,5430	0,4461	6,0415	5,5920	0,1846	1,0323	5,5920	0,1846	
35	19,6640	0,5544	10,9017	10,2890	0,2918	3,0023	3,0023	14,8300	0,4247	6,2983	6,4440	0,1829	1,1786	6,4440	0,1829	
40	19,7940	0,4928	9,7545	11,5560	0,2876	3,3235	3,3235	15,9120	0,3932	6,2566	7,2510	0,1805	1,3086	7,2510	0,1805	
45	19,9020	0,4388	8,7330	12,9480	0,2857	3,6992	3,6992	16,5330	0,3622	5,9883	8,0920	0,1788	1,4472	8,0920	0,1788	
50	19,9750	0,3967	7,9241	14,1810	0,2816	4,0934	4,0934	16,9530	0,3360	5,6969	8,9470	0,1767	1,5812	8,9470	0,1767	
55	20,0350	0,3604	7,2206	15,4790	0,2784	4,3094	4,3094	17,2340	0,3083	5,3132	9,6680	0,1756	1,6976	9,6680	0,1756	
60	20,0740	0,3330	6,6846	16,4870	0,2746	4,5273	4,5273	17,4030	0,2890	5,0289	10,4430	0,1742	1,8188	10,4430	0,1742	
65	20,1090	0,3081	6,1956	17,4170	0,2661	4,6347	4,6347	17,5100	0,2663	4,6629	11,3070	0,1732	1,9587	11,3070	0,1732	
70	20,1420	0,2865	5,7707	17,8640	0,2538	4,5339	4,5339	17,6240	0,2501	4,4078	12,0910	0,1710	2,0680	12,0910	0,1710	
75	20,0150	0,2668	5,3400	18,0600	0,2415	4,3615	4,3615	17,7600	0,2359	4,1896	12,7110	0,1686	2,1428	12,7110	0,1686	
80	20,0570	0,2499	5,0122	18,2530	0,2279	4,1599	4,1599	17,8930	0,2229	3,9879	13,4080	0,1661	2,2269	13,4080	0,1661	
85	20,0740	0,2348	4,7134	18,4000	0,2147	3,9505	3,9505	17,9930	0,2095	3,7693	14,0800	0,1643	2,3136	14,0800	0,1643	
90	20,0990	0,2229	4,4801	18,5090	0,2030	3,7573	3,7573	18,0300	0,1993	3,5934	14,7170	0,1628	2,3964	14,7170	0,1628	
95	20,1170	0,2109	4,2427	18,5710	0,1944	3,6102	3,6102	18,0900	0,1896	3,4299	15,3150	0,1600	2,4507	15,3150	0,1600	
100	20,1440	0,1992	4,0127	18,6520	0,1840	3,4320	3,4320	18,1440	0,1793	3,2532	15,6100	0,1542	2,4067	15,6100	0,1542	
U_0c	20,6080	0,6002		19,6950	0,0010			19,2330	0,0002		17,5510	0,0017		17,5510	0,0017	

## **Versicherung über die Selbstständigkeit**

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift



Eine CD mit den in der Arbeit benutzten Datenblättern ist bei Herrn Prof. Dr. Gustav Vaupel erhältlich.