



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

# **Bachelorarbeit**

**Omran Amini**

## **Entwicklung eines Speichers für ein Smart Grid Modell**

**Omran Amini**  
**Entwicklung eines Speichers für ein  
Smart Grid Modell**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau – Energie- und Anlagensysteme  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüferin: Prof. Dr.-Ing. Birgit Koeppen  
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Tankred Müller

Abgabedatum: 20.09.2019

# **Zusammenfassung**

**Omran Amini**

## **Thema der Bachelorthesis**

Entwicklung eines Speichers für ein Smart Grid Modell.

## **Stichworte**

Smart Grid, Energiespeicher, erneuerbare Energien, Arduino, elektrische Energieanlagen

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Entwicklung eines neuen Energiespeichers, für ein Smart Grid Modell an der Haw Hamburg. Inhaltlich werden zunächst einige allgemeine Funktionen, Eigenschaften und physikalischen Formen von Energiespeichern vorgestellt. Für die Auswahl der Speicherart werden die vorgestellten Energiespeicher, anhand ihrer Eigenschaften, unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen des Smart Grids unter einander verglichen um anschließend einen optimalen Speicher wählen zu können. Der praktische Teil der Arbeit beschreibt die Vorgehensweise bei der Dimensionierung sowie bei der endgültigen Umsetzung des Speichermoduls.

**Omran Amini**

## **Title of the paper**

Development of an energy storage for a smart grid model.

## **Keywords**

Smart grid, energy storage, renewable energy, Arduino, electrical energy systems

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the development of a new energy storage system for the smart grid model at the Haw Hamburg. First, some general functions, properties and physical forms of energy storage are presented. For the selection of the energy storage type, the presented energy storage devices are compared with each other on the basis of their properties, taking into account the given boundary conditions of the smart grid, in order then to be able to select an optimal storage. The practical part of the thesis describes the procedure for the dimensioning as well as the implementation of the energy storage module.

# Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis.....   | I  |
| Abbildungsverzeichnis.....  | II |
| Abkürzungsverzeichnis .....   | VI |
| 1 Einleitung .....  | 1  |
| 2 Versuchsaufbau und Problemstellung.....                               | 2  |
| 2.1 Aufbau des Smart Grid Modells .....                                 | 2  |
| 2.2 Ablauf des Laborversuches.....                                      | 5  |
| 2.3 Probleme des vorhandenen Speichers .....                            | 6  |
| 2.4 Allgemeine Funktion eines Energiespeicher .....                     | 7  |
| 2.4.1 Aufbau, Funktionsweise, und Aufgaben eines Energiespeichers ..... | 7  |
| 2.4.2 Unterkategorien von Energiespeichern.....                         | 9  |
| 2.4.3 Klassifizierung von Energiespeichern .....                        | 10 |
| 2.5 Technologien der Energiespeicherung.....                            | 12 |
| 2.5.1 Pumpspeicher.....   | 12 |
| 2.5.2 Schwungradspeicher .....  | 14 |
| 2.5.3 Kondensator .....   | 17 |
| 3 Auswahl eines geeigneten Energiespeichers.....                        | 21 |
| 3.1 Anforderungen an den Speicher .....                                 | 21 |
| 3.2 Auswahl der Speicherart .....                                       | 22 |
| 3.3 Dimensionierung des Speichers.....                                  | 22 |
| 4 Umsetzung und Inbetriebnahme des Speichers.....                       | 27 |
| 4.1 Funktionen .....  | 27 |
| 4.2 Umsetzung.....  | 27 |
| 4.3 Inbetriebnahme und Test der Funktionen.....                         | 34 |
| 5 Zusammenfassung und Ausblick .....                                    | 37 |
| 6 Literaturverzeichnis .....  | 38 |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 2.1: Schaltplan des Smart Grids .....                                   | 2  |
| Abbildung 2.2: PV-Anlage des Smart Grids.....                                     | 2  |
| Abbildung 2.3: Windenergieanlage des Smart Grids.....                             | 3  |
| Abbildung 2.4: Energiespeicher des Smart Grids.....                               | 4  |
| Abbildung 2.5: Last des Smart Grids .....   | 4  |
| Abbildung 2.6: Tagesgang des Smart Grids.....                                     | 5  |
| Abbildung 2.7: Gemessener Spannungsverlauf an der Last .....                      | 6  |
| Abbildung 2.8: Energiespeichersystem .....  | 8  |
| Abbildung 2.9: Einteilung in sektorale- und sektorenkoppelnde Speicher .....      | 10 |
| Abbildung 2.10: Aufbau des Pumpspeichers.....                                     | 12 |
| Abbildung 2.11: Gewählter Kontrollraum des Pumpspeichers.....                     | 13 |
| Abbildung 2.12: Massepunkt auf einer Kreisbahn .....                              | 15 |
| Abbildung 2.13: Aufbau eines Schwungradspeichers .....                            | 16 |
| Abbildung 2.14: Rotoreigenschaften unterschiedlicher Materiale.....               | 17 |
| Abbildung 2.15: a) ungeladener Kondensator, b) geladener Kondensator .....        | 18 |
| Abbildung 2.16: Lade- und Entladekurve eines Kondensators .....                   | 20 |
| Abbildung 3.1: Punkteverteilung der Energiespeicher in den einzelnen Kategorien.. | 22 |
| Abbildung 3.2: Leistungsmessung der Windenergieanlage.....                        | 23 |
| Abbildung 3.3: Leistungsmessung der PV-Anlage .....                               | 23 |
| Abbildung 3.4: Leistungsaufnahme der einzelnen Lasten bei 3V .....                | 23 |
| Abbildung 3.5: Leistungsverlauf des Smart Grids.....                              | 24 |
| Abbildung 3.6: Leistungsverlauf des Energiespeichers .....                        | 25 |
| Abbildung 3.7: Energieverlauf des Speichers.....                                  | 25 |
| Abbildung 4.1: Elektrischer Schaltplan des Energiespeichers.....                  | 28 |
| Abbildung 4.2: Reihenschaltung aus drei Kondensatoren in einer HPS-Box .....      | 28 |
| Abbildung 4.3: Spannungsmessung am Ausgang des Wandlers ohne Belastung ....       | 29 |
| Abbildung 4.4: 3D-Druck des Pumpspeichers .....                                   | 31 |
| Abbildung 4.5: Verschaltung auf dem Arduino-Shield .....                          | 32 |
| Abbildung 4.6: Zuordnung der Steckverbindungen .....                              | 32 |
| Abbildung 4.7: Fertig verbauter Energiespeicher .....                             | 33 |
| Abbildung 4.8: Spannungsmessung, am Ausgang des Wandlers unter Belastung ...      | 34 |
| Abbildung 4.9: Veranschaulichung des Innenwiderstandsproblem ohne Wandler ....    | 35 |
| Abbildung 4.10: Veranschaulichung des Innenwiderstandsproblem mit Wandler .....   | 35 |

Abbildung 4.11: Spannungsverlauf der Last mit dem neuen Speicher .....36

## Symbolverzeichnis

| Symbol         | Einheit              | Beschreibung                    |
|----------------|----------------------|---------------------------------|
| $U_N$          | [V]                  | Nennspannung                    |
| $U_c$          | [V]                  | Kondensatorspannung             |
| m              | [kg]                 | Masse                           |
| t              | [s]                  | Zeit                            |
| g              | [m/s <sup>2</sup> ]  | Erdbeschleunigung               |
| h              | [m]                  | Höhe                            |
| s              | [m]                  | Strecke                         |
| F              | [N]                  | Kraft                           |
| A              | [m <sup>2</sup> ]    | Fläche                          |
| p              | [bar]                | Druck                           |
| q              | [J/kg]               | Spezifische Wärme               |
| $\rho$         | [kg/m <sup>3</sup> ] | Dichte                          |
| v              | [m/s]                | Geschwindigkeit                 |
| r              | [m]                  | Radius                          |
| $\omega$       | [1/s]                | Winkelgeschwindigkeit           |
| $\omega_u$     | [1/s]                | Untere Winkelgeschwindigkeit    |
| J              | [kg/m <sup>2</sup> ] | Massenträgheitsmoment           |
| C              | [F]                  | Elektrische Kapazität           |
| Q              | [A·s]                | Elektrische Ladung              |
| d              | [m]                  | Durchmesser                     |
| e              | [-]                  | Eulersche Zahl                  |
| $\tau$         | [-]                  | Zeitkonstante                   |
| $\dot{P}$      | [W]                  | Leistungsänderungsrate          |
| P              | [W]                  | Leistung                        |
| $P_N$          | [W]                  | Nennleistung                    |
| $P_{Laden}$    | [W]                  | Ladeleistung                    |
| $P_{Entladen}$ | [W]                  | Entladeleistung                 |
| $P_{PV}$       | [W]                  | Leistung der Photovoltaikanlage |
| $P_{Wind}$     | [W]                  | Leistung der Windenergieanlage  |
| $P_{Last}$     | [W]                  | Leistungsaufnahme der Last      |

|                       |                     |   |
|-----------------------|---------------------|---|
| $P_{\text{Speicher}}$ | [W]                 | Leistung des Speichers                    |
| $E$                   | [Ws]                | Energie                                   |
| $E_{\text{Nutz}}$     | [Ws]                | Nutzenergie                               |
| $E_{\text{ges.}}$     | [Ws]                | Gesamtenergie                             |
| $E_{\text{Rest}}$     | [Ws]                | Restenergie                               |
| $E_{\text{kin}}$      | [Ws]                | Kinetische Energie                        |
| $E_p$                 | [Ws]                | Druckenergie                              |
| $E_{\text{pot}}$      | [Ws]                | Potenzielle Energie                       |
| $E_{3V}$              | [Ws]                | Kondensatorenergie bei 3V                 |
| $E_{\text{rot}}$      | [Ws]                | Rotationsenergie                          |
| $W_{\text{el.}}$      | [Ws]                | Elektrische Energie                       |
| $W_T$                 | [Ws]                | Technische Arbeit der Turbine             |
| $w_t$                 | [J/kg]              | Spezifische technische Arbeit der Turbine |
| $e_v$                 | [J/m <sup>3</sup> ] | Volumetrische Energiedichte               |
| $t_{\text{Zugriff}}$  | [s]                 | Zugriffszeit                              |
| $\eta$                | [-]                 | Wirkungsgrad                              |
| $\eta_T$              | [-]                 | Turbinenwirkungsgrad                      |
| $\eta_G$              | [-]                 | Generatorwirkungsgrad                     |
| $\eta_{\text{ges.}}$  | [-]                 | Gesamtwirkungsgrad                        |
| $\varepsilon$         | [As/Vm]             | Permittivität                             |
| $\varepsilon_0$       | [As/Vm]             | Absolute Permittivität                    |
| $\varepsilon_r$       | [-]                 | Relative Permittivität                    |

## Abkürzungsverzeichnis

|           |  |
|-----------|--|
| PV-Anlage | Photovoltaikanlage                     |
| AV-Modul  | Ampere-Volt-Modul                      |
| MPP       | Maximum Power Point                    |
| DC        | Direct Current                         |
| CFK       | Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff |

# 1 Einleitung

Die heutige Stromversorgung besteht aus einem Mix, aus konventionellen, sowie erneuerbaren Energien. Die erneuerbaren Energien machen dabei einen nicht zu vernachlässigen Anteil an der Gesamtproduktion aus. Trotz ihres schwankenden Energieangebots muss stetig, eine unterbrechungsfreie und stabile Versorgung bereitgestellt werden. Aus diesem Grund werden Energiespeicher immer bedeutsamer, da sie die Möglichkeit bieten genau solche Schwankungen auszugleichen und für eine nachhaltige Energieversorgung essenziell sind. In einem Intelligenten Stromnetz, auch Smart Grid genannt, kommunizieren Erzeuger, Speicher und Verbraucher miteinander, umso eine optimale Energieversorgung möglich zu machen.

Für Studierende an der HAW Hamburg besteht die Möglichkeit, im Rahmen eines Laborversuches, begleitend zum Modul elektrische Energieanlagen ein Smart Grid Netzwerk zu untersuchen. Ziel des Laborversuches ist es auf die technischen Anforderungen, sowie mögliche Probleme aufmerksam zu machen, die ein solches Smart Grid mit sich bringt. Wie in einem realen Smart Grid besitzt dieser ebenfalls einen Energiespeicher, jedoch ist dieser, in seiner Funktion als Energiespeicher eingeschränkt.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird sich mit der Neuentwicklung eines Energiespeichers, für das Smart Grid Modell befasst. Inhaltlich werden zunächst einige allgemeine Funktionen, Eigenschaften und physikalischen Formen von Energiespeichern vorgestellt. Für die Auswahl der Speicherart werden die vorgestellten Energiespeicher, anhand ihrer Eigenschaften, unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen des Smart Grids untereinander verglichen um anschließend einen optimalen Speicher wählen zu können. Der praktische Teil der Arbeit beschreibt die Vorgehensweise bei der Dimensionierung sowie bei der endgültigen Umsetzung des Speichermoduls. Abschließend findet eine Erprobung des fertigen Speichermoduls im Smart Grid statt.

## 2 Versuchsaufbau und Problemstellung

### 2.1 Aufbau des Smart Grid Modells

Das Smart Grid Modell besteht aus einem Gleichspannungsnetzwerk von einzelnen elektrischen Komponenten, welche mittels eines Steckbrettes verbunden werden können. Hauptbestandteil des Modells sind die Energieanlagen, die aus einer PV-Anlage, einer Windenergieanlage sowie einem Energiespeicher bestehen. Anhand von AV-Modulen sowie von Smart-Metern können Spannungen, Energiemengen, sowie die eingespeisten Leistungen angezeigt werden. Abbildung 2.1 zeigt den Verschaltungsplan der einzelnen Komponenten.

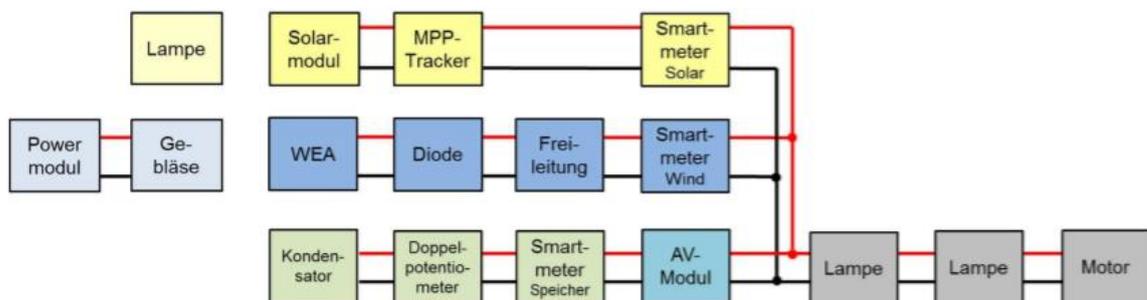


Abbildung 2.1: Schaltplan des Smart Grids (Koeppen, 2018)

#### PV-Anlage:

Die gesamte Wirkungskette der PV-Anlage besteht aus einem Solarmodul, MPP-Tracker sowie einem Smart-Meter. Die Sonneneinstrahlung, auf die Solarzelle wird durch eine 120W Glühlampe simuliert. Mittels einer Vorrichtung kann der Einstrahlwinkel auf das Solarmodul in fünf verschiedenen Winkel manuell eingestellt werden. Der MPP-Tracker sorgt dafür, dass das Solarmodul immer die größtmögliche Leistung liefert. (leXsolar, o.J)

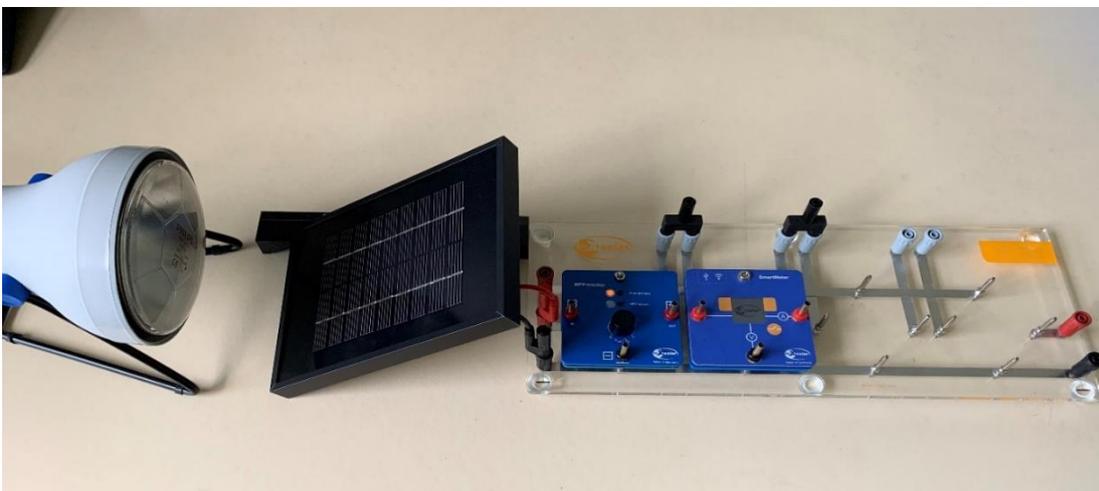


Abbildung 2.2: PV-Anlage des Smart Grids

### Windenergieanlage:

Die Windenergieanlage besteht aus einem Drei-Blatt Rotor, welcher einen elektrischen Generator im inneren der Gondel antreibt. Der Wind wird durch ein 12-Stufigem Gebläse erzeugt. Weitere Komponenten des gesamten Strangs ist eine Diode, eine Freileitung sowie ein Smart-Meter. Anhand der Diode wird verhindert, dass die Windenergieanlage Leistung aus dem Netz aufnimmt und somit der so genannte Ventilatorbetrieb verhindert wird. Die Freileitung simulieren die Übertragungsverluste, die beim Transport zustande kommen, dieser besteht in diesem Fall aus einem konstanten ohmschen Widerstand, welcher im inneren der Freileitung verbaut ist. (leXsolar, o.J)

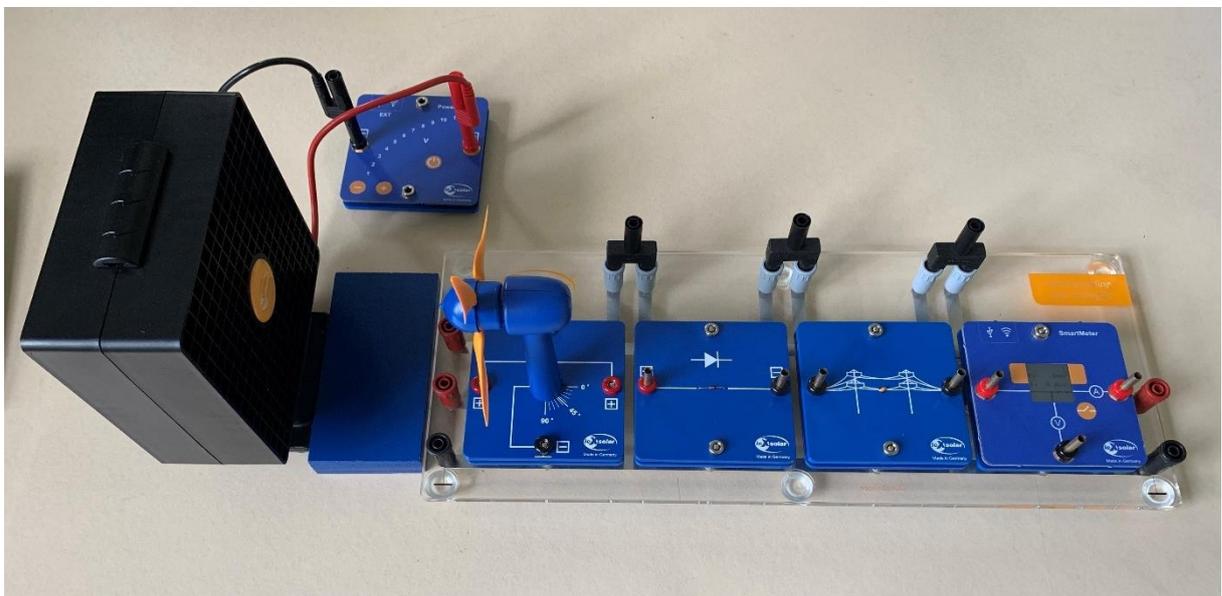


Abbildung 2.3: Windenergieanlage des Smart Grids

### Energiespeicher:

Der Energiespeicher liegt in Form eines Kondensators, mit einer Kapazität von 5F und einer Nennspannung von 5,4V vor. Durch das angebundene Potentiometer kann die Lade- bzw. Entladeleistung eingestellt werden. (leXsolar, o.J)



Abbildung 2.4: Energiespeicher des Smart Grids

### Last:

Die Last besteht aus zwei kleinen Glühlampen, sowie einem Elektromotor. Dabei sollen die Glühlampen die kleineren Verbraucher im Netz, wie z.B. Haushalte darstellen. Größere Verbraucher, wie die Industrie werden über den Elektromotor simuliert, da dieser eine höhere Leistungsaufnahme besitzt, als die Glühlampen. Versorgt wird die Last über die Energieanlagen. (leXsolar, o.J)

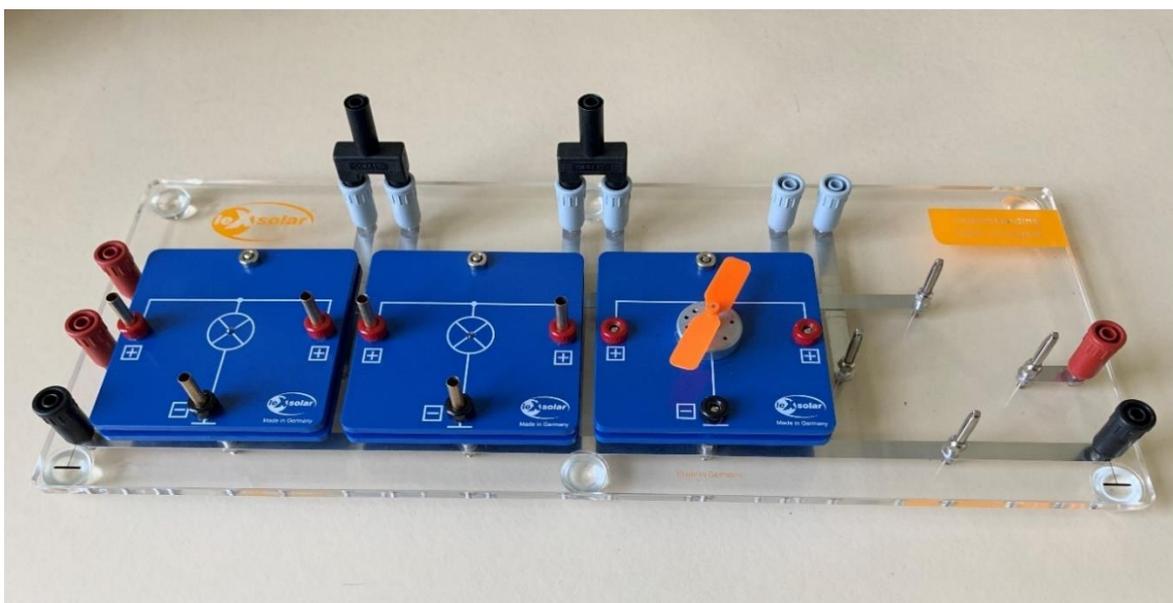


Abbildung 2.5: Last des Smart Grids

## 2.2 Ablauf des Laborversuches

In dem Laborversuch wird ein konventionelles Kraftwerk durch ein Energiespeicher ersetzt, umso eine Energieversorgung aus rein erneuerbaren Energiequellen zu simulieren. Ziel ist es, die Spannung an der Last auf konstante 3V zu halten. Wenn zu wenig Leistung durch die PV-, und Windenergieanlage eingespeist wird, soll das Leistungsdefizit durch den Energiespeicher kompensiert werden. Ebenfalls, wenn die Spannung an der Last die 3V übersteigt, also zu viel Leistung im Netz vorhanden ist, soll die überschüssige Leistung genutzt werden, um den Speicher zu laden. Dabei ist zu erwähnen, dass das reale Stromnetz nicht mit Gleichstrom, sondern mit Wechselstrom bzw. Drehstrom betrieben wird. Die Spannungserhaltung, in dem Modellversuch repräsentiert die Frequenzerhaltung des Wechselstromnetz. Das Verbundnetz in Europa wird mit einer Frequenz von 50Hz betrieben, sobald Erzeugung und Verbrauch nicht gleich groß sind, spiegelt sich dies in einer Änderung der Frequenz dar. Anhand des Laborversuches soll ein kompletter Tagesgang von 24 Stunden eines Smart Grids untersucht werden, bei unterschiedlicher Last sowie veränderlichen Einspeisebedingungen für die Energieanlagen. Der gesamte Versuch hat eine Dauer von 24 Minuten, sodass eine Skalierung von 1 Minute  $\cong$  1 Stunde simuliert entspricht. Abbildung 2.6 zeigt den vorgegebenen Verlauf, bei welcher Tageszeit welche Lastsituation, Windstufe sowie welcher Einstrahlwinkel auf die Solarzelle einzustellen ist.

| Tageszeit<br>Uhr | Sim. Zeit<br>min | Vorgaben             |                  |                          |
|------------------|------------------|----------------------|------------------|--------------------------|
|                  |                  | Lastvariationen      | Windstufe<br>[V] | Solareinstrahlung<br>[°] |
| 0                | 0                | 1 Lampe              | 3                | aus                      |
| 2                | 2                | 1 Lampe              | 4                | aus                      |
| 4                | 4                | 1 Lampe              | 5                | aus                      |
| 6                | 6                | 1 Lampe              | 6                | 55                       |
| 8                | 8                | 2 Lampen             | 7                | 30                       |
| 10               | 10               | 2 Lampen und 1 Motor | 8                | 15                       |
| 12               | 12               | 2 Lampen             | 9                | 0                        |
| 14               | 14               | 2 Lampen und 1 Motor | 10               | 15                       |
| 16               | 16               | 2 Lampen             | 11               | 30                       |
| 18               | 18               | 1 Lampe              | 12               | 55                       |
| 20               | 20               | 1 Lampe              | 12               | aus                      |
| 22               | 22               | 1 Lampe              | 12               | aus                      |
| 24               | 24               | 1 Lampe              | 12               | aus                      |

Abbildung 2.6: Tagesgang des Smart Grids (Koeppen, 2018)

### 2.3 Probleme des vorhandenen Speichers

Wie schon erwähnt soll die Spannung an der Last auf konstante 3V gehalten werden, d.h., dass die Energieanlagen und der Speicher zu jedem Zeitpunkt genügend Leistung zur Verfügung stellen müssen um dieses zu Gewährleisten. Der Kondensator hat eine Nennspannung von 5,4V, jedoch hängt die Spannung an einem Kondensator vom Ladezustand ab, sodass die Spannung während des Entladens sinkt. Da es keine manuelle Steuerung für den Speicher gibt, ob dieser im Lade- oder Entladezustand arbeiten soll, wird der Speicher passiv über die Last gesteuert. Solange die Spannung an der Last größer als die Spannung am Kondensator ist wird der Speicher geladen, und wenn die Spannung an der Last kleiner als die am Kondensator ist wird der Speicher entladen. So kann die Situation entstehen, dass sich der Speicher entlädt, obwohl schon genügend Leistung im Netz vorhanden ist oder, dass der Speicher Leistung aufnimmt, obwohl mehr Leistung im Netz erforderlich ist. Dies hat zur Folge, dass das Leistungsdefizit nicht durch den Energiespeicher kompensiert wird, und somit die Spannung an der Last starken Schwankungen unterliegt. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Energiemenge, die der Speicher besitzt, ebenfalls zu gering ist. Bei der Vorgabe von 3V an der Last, war der Speicher nach kurzer Zeit komplett entladen. Um den Versuch trotzdem durchführen zu können, wurde die Spannungsvorgabe, an der Last auf 2V herabgesetzt.

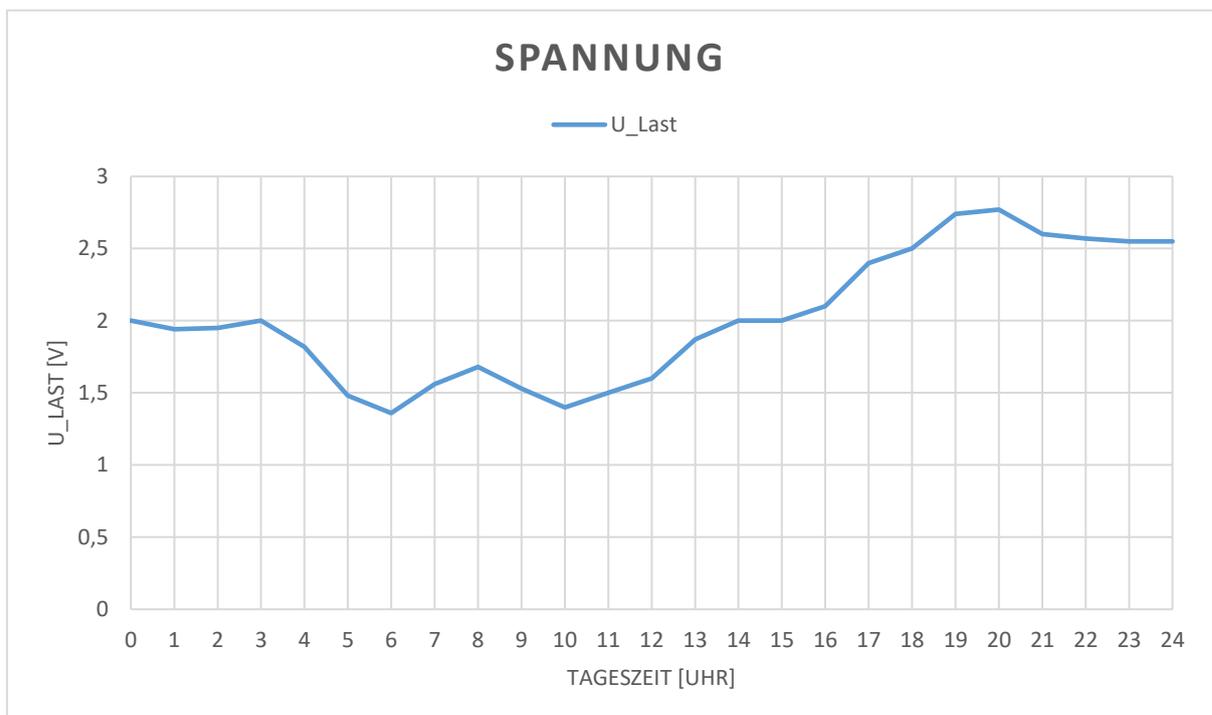


Abbildung 2.7: Gemessener Spannungsverlauf an der Last

Abbildung 2.7 zeigt den Spannungsverlauf, welcher sich an der Last einstellt. Es ist zu erkennen, dass die geforderte Spannung zu Anfang gehalten werden kann. Mit der Zeit bricht die Spannung jedoch ein, da nicht mehr genügend Leistung im Netz vorhanden ist. Von 3 Uhr bis 14 Uhr ist die Spannung unterhalb der geforderten 2V, in diesem Zeitraum müsste der Speicher, das Leistungsdefizit im Netz kompensieren. Ab 14 Uhr kann die Spannung für kurze Zeit auf 2V gehalten werden, jedoch steigt sie im weiteren Verlauf an. In der Zeit von 15 bis 24 Uhr liegt eine höhere Spannung als gefordert an, zu diesem Zeitpunkt müsste der Energiespeicher geladen werden, um Leistung aus dem Netz zu entnehmen, dies ist jedoch mit dem vorhandenen Speicher momentan nicht möglich.

## 2.4 Allgemeine Funktion eines Energiespeicher

### 2.4.1 Aufbau, Funktionsweise und Aufgaben eines Energiespeichers

Ein Energiespeicher besteht aus einer Speichereinheit z.B. ein Behältnis, in der Speichereinheit wird der Energieträger gelagert bzw. gespeichert. Die drei Prozesse eines Energiespeichers sind das Laden, Halten und das Entladen. Die Energie des Energieträgers kann in Form von kinetischer Energie, potenzieller Energie, thermischer Energie, chemische Energie sowie elektrischer Energie vorliegen. Die Umwandlung von einer Energieform in eine andere ist im Allgemeinen möglich, so muss jedoch stets, laut Energieerhaltungssatz die Summe aller Energien in einem System gleich sein, so kann Energie nie vernichtet oder erzeugt werden. In der Praxis sind solche Umwandlungsprozesse stets verlustbehaftet, d.h. die Sekundärenergie ist stets kleiner als die ursprünglich genutzte Primärenergie. Die Effizienz solcher Umwandlungen werden durch die dimensionslose Kennzahl  $\eta$  beschrieben, auch Wirkungsgrad genannt. (Sterner, et al., 2017 S. 26-27)

$$\eta = \frac{E_{aus}}{E_{ein}} \quad (2.1)$$

Die Effizienz bzw. der Gesamtwirkungsgrad eines Energiespeicher hängt vor allem von der Anzahl der physikalischen Umwandschritte, die zwischen den drei Prozessen stattfinden. Ebenso hat die Speicherzeit eine Auswirkung auf diese, da auch beim Halten der Energie Verluste auftreten. Es gilt, dass der gesamte Wirkungsgrad eines Systems, das Produkt aller einzelner ist. (Sterner, et al., 2017 S. 27)

$$\eta_{gesamt} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots \cdot \eta_n \quad (2.2)$$

Aus technischer Sicht bezieht sich der Begriff Energiespeicher rein auf die Speichereinheit in dem sich der Energieträger befindet, jedoch wird meist der Begriff Energiespeicher als synonym für ein Energiespeichersystem genutzt. Ein Energiespeichersystem beinhaltet

Speicher, Energiewandler und alle restlichen technischen Komponenten, die für den Betrieb erforderlich sind. Vereinfacht wird in dieser Arbeit ebenfalls die kurze Schreibweise verwendet. (Sterner, et al., 2017 S. 26)

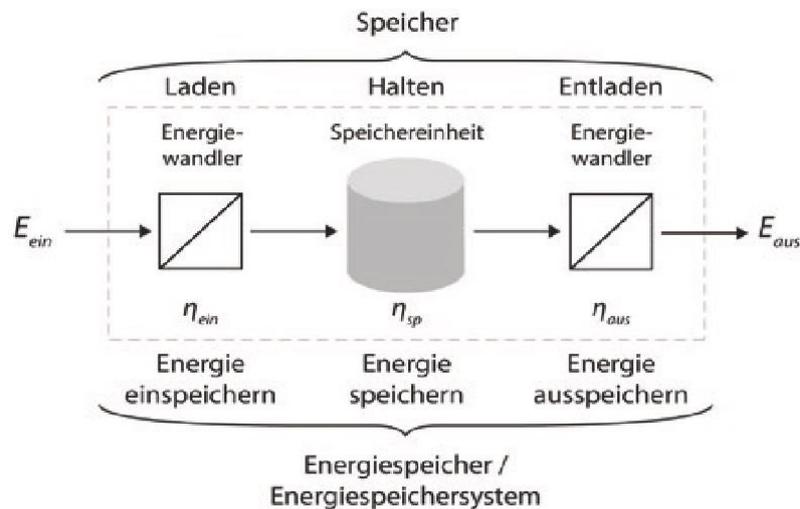


Abbildung 2.8: Energiespeichersystem (Sterner, et al., 2017)

Energiespeicher können, als zusätzliche Flexibilitätsoption Schwankungen ausgleichen, in dem sie Überschüsse aufnehmen und Defizite decken. Die Hauptaufgabe eines Energiespeichers besteht in der Bevorratung von Energie, um für einen zeitlichen Ausgleich in der Energieversorgung zu sorgen. Vor allem in der Wärme- und Stromversorgung spielen Energiespeicher eine wichtige Rolle. Die Energiebereitstellung von solarthermischen Anlagen deckt sich in den seltensten Fällen mit der Nachfrage an thermischer Energie. Thermische Speicher sind in der Lage den Überschuss zur Mittagszeit zu nutzen, um die Defizite am Abend auszugleichen. In der Stromversorgung ist die Waage aus Stromproduktion und Verbrauch essenziell. Damit die Frequenzerhaltung gewährleistet ist, muss zu jedem Zeitpunkt Nachfrage und Angebot, an elektrischer Energie ausgeglichen sein. So bieten Energiespeicher die Möglichkeit negative Regelleistung, bei Energieüberschuss im Netz sowie positive Regelleistung bei erhöhter Nachfrage an elektrischer Energie, bereitzustellen. Dadurch kann das Abriegeln bzw. Drosseln von Wind- und Photovoltaikanlagen vermindert werden. Energiespeicher werden nicht nur für die Stromerzeugung von erneuerbaren Energien genutzt, sondern auch bei konventionellen Kraftwerken. So werden, unter anderem Pumpspeicher genutzt um den Überschuss an elektrischer Energie in der Nacht, auf die Lastspitzen am Tag umzuverteilen. (Sterner, et al., 2017 S. 34)

## 2.4.2 Unterkategorien von Energiespeichern

Energiespeicher werden in Unterkategorien eingeordnet, so gibt es primäre- oder sekundäre Speicher, welche weiterhin in sektorale- oder sektorenkoppelnde Speicher untergeordnet werden. Die Sektoren der Energiewirtschaft bestehen aus dem Stromsektor, Wärmesektor, Gassektor sowie dem Verkehrssektor. (Sterner, et al., 2017 S. 27)

### Primäre Energiespeicher:

Primäre Energiespeicher werden nur einmal geladen und entladen, zu ihnen zählen überwiegend die fossilen Brennstoffe. Ihre Einspeicherung erfolgt über einen langen Zeitraum in Erdöllager, Kohlehalden oder auch Erdgasspeicher. Die Ausspeicherung erfolgt einmalig über das Verbrennen dieser Energieträger. (Sterner, et al., 2017 S. 27)

### Sekundäre Energiespeicher:

Sekundäre Energiespeicher können mehrfach geladen sowie entladen werden. Zu ihnen zählen z.B. Akkumulatoren. (Sterner, et al., 2017 S. 27)

### Sektorale Energiespeicher:

Sektorale Energiespeicher werden in nur einem Energiesektor verwendet. Das Laden sowie Entladen geschehen bidirektional im selben Sektor. (Sterner, et al., 2017 S. 28)

### Sektorenkoppelnden Energiespeicher:

Sektorenkoppelnden Energiespeicher verbinden mindestens zwei Energiesektoren miteinander. Das Laden und das Entladen geschehen nicht im selben Sektor. Diese Art von Energiespeicher sind vor allem in Verbindung mit erneuerbaren Energieerzeugern von großer Bedeutung. So wird überwiegend elektrische Energie als Primärenergie genutzt, um zur Dekarbonisierung der restlichen Sektoren beizutragen. Die Wandlung geschieht in der Regel unidirektional d.h. die Energie wird nicht wieder in elektrische Energie zurück gewandelt. Diese Sektorenkoppelung wird über dem Sammelbegriff „Power-to-X“ betrieben. (Sterner, et al., 2017 S. 26-31)

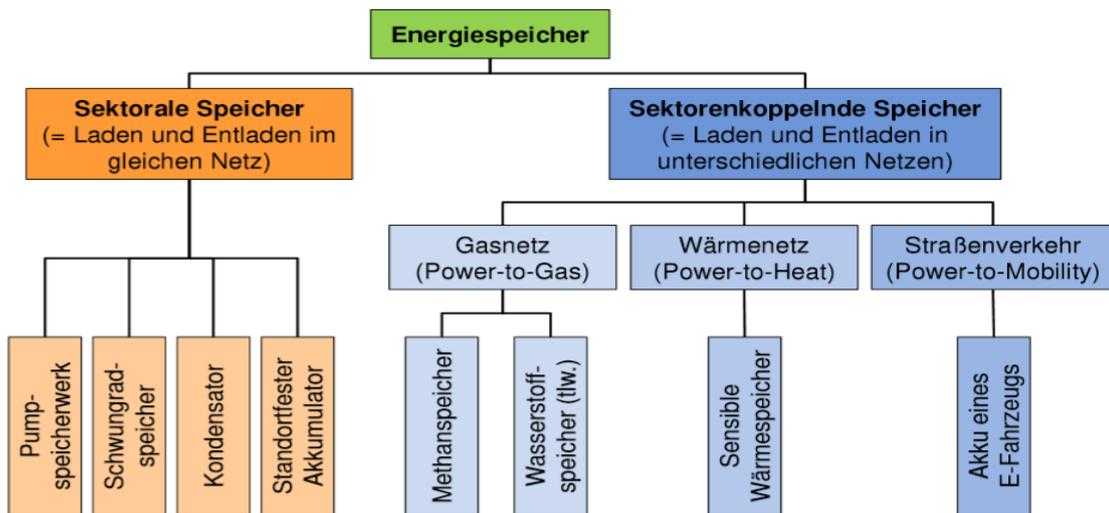


Abbildung 2.9: Einteilung in sektorale- und sektorenkoppelnde Speicher (Koeppen, 2018)

### 2.4.3 Klassifizierung von Energiespeichern

Durch die Klassifizierung verschiedener Speicherarten, anhand von wichtigen Kenngrößen sowie Eigenschaften lassen sich Energiespeicher untereinander vergleichen, um je nach Verwendung einen passenden Speicher auszuwählen.

Eine verbreitete Einordnung von Energiespeichern, ist die Unterscheidung von Speichern, anhand der physikalischen Form der gespeicherten Energie. Grundsätzlich lassen sich Speicher in elektrische, chemische, mechanische oder thermische Energiespeicher einordnen. Aus diesen vier Energieformen lassen sich weitere Untergruppen bilden, so werden mechanische Energiespeicher nochmals in potenzielle, oder kinetische Energiespeicher unterteilt. Eine weitere Wichtige Untergruppe der chemischen Speicher bilden die elektrochemischen Energiespeicher, ihnen werden Batterien, sowie Akkumulatoren zugeordnet. (Sterner, et al., 2017 S. 36-37)

Die energetische Klassifizierung wird anhand von Leistungsgrößen, Energiemengen, und Wirkungsgraden vorgenommen. Mit zu den wichtigsten Kennzahlen eines Speichers sind die Leistungsgrößen. Dabei ist nicht nur die Entladeleistung, die ein Speicher im Bedarf zur Verfügung stellen kann von Bedeutung, sondern ebenfalls Größen wie Ladeleistung oder auch die Verlustleistungen. Die Entlade- sowie Ladeleistung eines Speichers können unterschiedlich groß sein, dass hängt unter anderem vom Lade- sowie Entladewirkungsgrad ab. (Sterner, et al., 2017 S. 38-40)

$$P_{Laden} = \frac{dE}{dt} \cdot \eta_{Laden} \quad (2.3)$$

$$P_{Entladen} = \frac{dE}{dt} \cdot \eta_{Entladen} \quad (2.4)$$

In der Regel entstehen solche Verluste aufgrund von Dissipation, die beim Wandeln der Energie entsteht, und als irreversible Wärme freigesetzt werden. Ebenso können Verluste beim Halten entstehen, ohne das Leistung aus dem System entnommen wird aufgrund von Selbstentladung. Die Verlustleistung durch Selbstentladung ist vor allem bei Langzeitspeicher ausschlaggebend, da sie meist weit höher ausfallen können als die restlichen Verlustleistungen. (Sterner, et al., 2017 S. 38-40)

Die Kapazität eines Speichers gibt an wieviel Energie in ihm gespeichert werden kann, und ist eine wesentliche Größe bei der Dimensionierung. Meist jedoch steht nicht die gesamte gespeicherte Energie als nutzbare Energie zur Verfügung. Aus technischen Gründen wird, in einigen Fällen der Speicher nicht komplett Entladen, es bleibt immer eine bestimmte Menge an nicht nutzbarer Restenergie im Speicher über. Die Nutzenergie ist die Differenz aus Gesamtenergie und Restenergie. (Koeppen, 2018 S. 6)

$$E_{Nutz} = E_{ges.} - E_{Rest} \quad (2.5)$$

Um die verschiedenen Speicherarten, hinsichtlich ihrer gespeicherten Energiemenge vergleichbar zu machen, werden spezifische Energiedichten angegeben. Die volumetrische Energiedichte  $e_v$  gibt die gesamte gespeicherte Energie in Bezug auf das Volumen wieder. (Sterner, et al., 2017 S. 41)

$$e_v = \frac{E_{ges}}{V} \quad (2.6)$$

Eine weitere wichtige Kenngröße eines Energiespeichers ist die Zugriffszeit. Jede Anlage hat eine gewisse Trägheit, die je nach Art und Größe des Speichers variiert. Wird ein Speicher angesteuert, braucht dieser eine gewisse Zeit, bis die gewünschte Leistung erreicht ist. Die Leistungsänderungsrate beschreibt den Leistungsgradient.

$$\dot{P} = \frac{dP}{dt} \quad (2.7)$$

Die Zugriffszeit lässt sich aus der Leistungsänderungsrate und der Nennleistung bestimmen (Koeppen, 2018 S. 10).

$$t_{Zugriff} = \frac{P_N}{\dot{P}} \quad (2.8)$$

Bei der Auswahl eines Energiespeichers sind nicht nur die technischen Eigenschaften von Bedeutung, sondern ebenfalls der ökonomische Aspekt. Die Gesamtkosten setzen sich aus den Investitionskosten sowie den Betriebskosten zusammen. Jedoch ist ein Vergleich hinsichtlich der Kosten nur bedingt möglich, da diese von vielen Faktoren abhängig sind. So

müssen die Gesamtkosten für jeden Speicher individuell ermittelt werden. (Sternner, et al., 2017 S. 46)

Die Kosten für den Speicher des Smart Grid Modells, werden überwiegend über die Energiewandlungsmaschinen sowie den Hilfsaggregaten bestimmt.

## 2.5 Technologien der Energiespeicherung

In diesem Abschnitt werden einige ausgewählte Energiespeicher vorgestellt, welche mit dem Smart Grid Modell kompatibel sind. Thermische und rein chemische Speicher werden nicht betrachtet, da sie vor allem als sektorenkoppelnde Energiespeicher, und nur unidirektional im Stromsektor verwendet werden.

### 2.5.1 Pumpspeicher

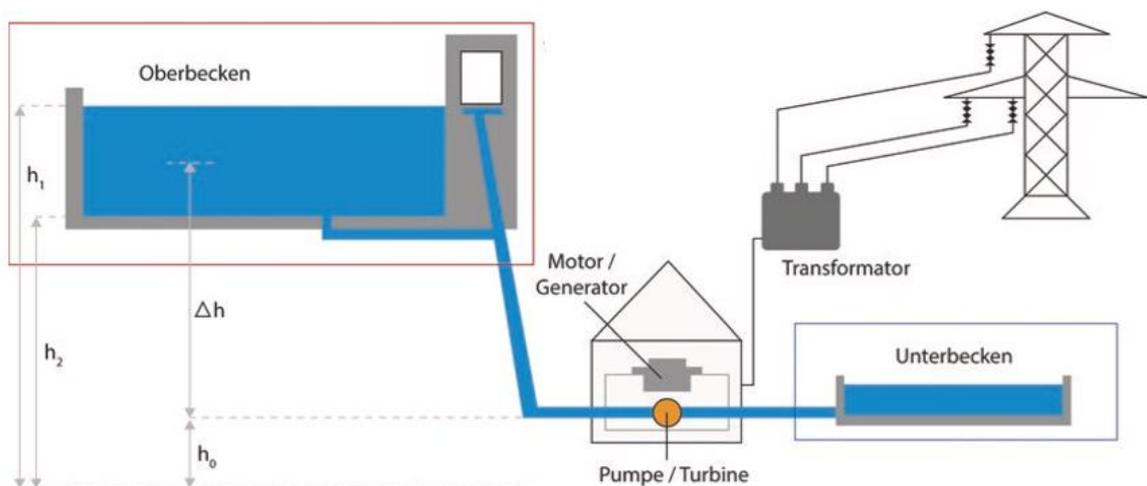


Abbildung 2.10: Aufbau des Pumpspeichers (Sternner, et al., 2017)

Pumpspeicher gehören zu den sektoralen Energiespeichern und werden hauptsächlich im Stromsektor genutzt. Sie weisen mit Abstand, im Vergleich zu anderen physikalischen Speichern das größte Speicher-, sowie Leistungsvermögen auf. Ein Pumpspeicher speichert Energie in Form von potenzieller Energie. Er besteht aus einem Oberbecken und einem Unterbecken die mit Wasser gefüllt sind. Die Prinzipien der Energiespeicherung beruhen auf der klassischen Newton'schen Mechanik. (Watter, 2018)

1. *Kinetische Energie:*

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot c^2 \quad (2.9)$$

2. *Potenzielle Energie:*

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \quad (2.10)$$

### 3. Druckenergie (Verschiebearbeit):

$$E_p = F \cdot \Delta s = (p \cdot A) \cdot \Delta s = p \cdot (A \cdot \Delta s) = p \cdot \Delta V \quad (2.11)$$

Anhand des ersten Hauptsatzes, für stationäre Strömungen eines inkompressiblen Fluids lässt sich die nutzbare spezifische Arbeit errechnen. Dabei wird der Kontrollraum so gewählt, dass dieser auf den offenen Wasseroberflächen der beiden Reservoirs abschließt.

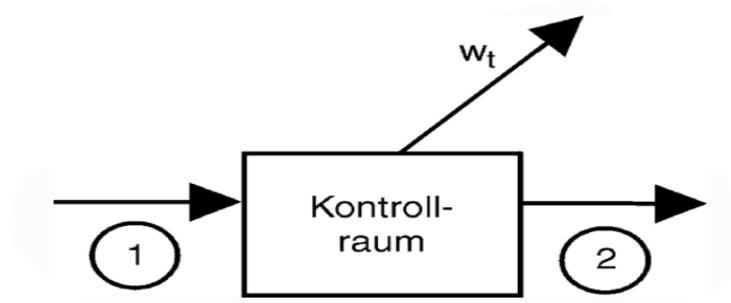


Abbildung 2.11: Gewählter Kontrollraum des Pumpspeichers (Zahoransky, 2019)

$$q + w_t = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho} + g \cdot \Delta h + \frac{1}{2} \cdot (c_1^2 - c_2^2) \quad (2.12)$$

Da keine Wärme zu- oder abgeführt wird, und die entstehende Wärme, durch Reibung vernachlässigt wird kann  $q = 0$  angenommen werden. Die Wasserbecken sind sehr groß, daher werden sich die Wasserspiegel nicht schnell senken oder heben, so kann die Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche auf beiden Seiten vernachlässigt werden  $c_1 \approx c_2 \approx 0$ . Auf beiden Oberflächen wirkt ebenfalls der gleiche atmosphärische Druck, sodass  $p_1 - p_2 = 0$  ergibt. Anhand dessen vereinfacht sich die Formel folgendermaßen:

$$w_t = g \cdot \Delta h \quad (2.13)$$

$$W_t = m \cdot g \cdot \Delta h \quad (2.14)$$

Die sich dabei ergebende spezifische technische Arbeit ist negativ, da sie dem System entnommen wird. Unter Berücksichtigung von Wirkungsgraden wird die entnommene Arbeit, an der Turbine in kinetische Rotationsenergie gewandelt und am Generator in Form von elektrischer Energie ins elektrische Netz eingespeist.

$$W_T = W_t \cdot \eta_T \quad (2.15)$$

$$W_{el.} = W_t \cdot \eta_T \cdot \eta_G \quad (2.16)$$

Unter Berücksichtigung aller Verluste ergibt sich allgemein:

$$W_{el.} = V \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta h \cdot \eta_{ges.} \quad (2.17)$$

Somit ist die zugeführte elektrische Energie, die zum Einspeichern genutzt wird, stets größer als die Ausgespeicherte. Der Wirkungsgrad solcher Anlagen bewegt sich in einem Bereich von 70-82%. Die Verluste setzen sich vor allem aus Wandlungsverlusten, sowie hydraulischen Verlusten zusammen. (Zahoransky, 2019 S. 340)

Beim Laden des Speichers wird elektrische Energie genutzt, um das Wasser von einem niedrigeren Potenzial auf ein höheres zu heben. Dabei fungiert die Pumpe als Energiewandler, welche die elektrische Energie in potenzielle Energie umwandelt. Die potenzielle Energie ist in dem Speichermedium Wasser gespeichert, die Menge der gespeicherten Energie hängt vom Höhenunterschied zum unteren Becken, sowie von der Masse des Wassers ab. Je mehr und höher das Wasser vom unteren Becken in das obere gepumpt wird, desto mehr Energie kann im Wasser gespeichert werden, jedoch muss gleichzeitig mehr Energie beim Laden aufgewendet werden. Das Entladen entspricht der Rückwandlung der potenziellen Energie in elektrische Energie. Beim Entladen dient die Turbine als Energiewandler, so benötigt ein Pumpspeicher insgesamt zwei Energiewandler. (Sterner, et al., 2017 S. 26)

In der Regel müssen die Pumpen des Speichers immer mit was gefüllt bleiben, sodass die komplette Rückwandlung der Energie nicht möglich ist und ein geringer Teil als nicht nutzbarer Restenergie verbleibt. Obwohl Pumpspeicher sehr viel Energie speichern können, besitzen sie, auf ihr Volumen bezogen eine sehr geringe Energiedichten. Diese liegen bei  $1,5 \text{ kWh/m}^3$ . (Koeppen, 2018)

Pumpspeicher besitzen eine relativ hohe Zugriffszeit, und benötigen einige Minuten, um ihre Nennleistung zu erreichen. (Koeppen, 2018 S. 32)

### 2.5.2 Schwungradspeicher

Die Energie in einem Schwungradspeicher wird in Form von kinetischer Energie gespeichert, in dem eine Masse um eine festgelegte Drehachse in eine rotatorische Bewegung gesetzt wird.

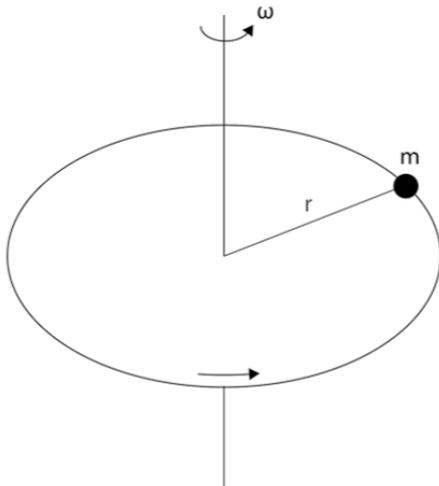


Abbildung 2.12: Massepunkt auf einer Kreisbahn (Sterner, et al., 2017)

Vereinfacht wird zunächst ein Massepunkt betrachtet, welcher sich mit einer Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , in einem Radius  $r$  um seine eigene Achse bewegt. Für die Geschwindigkeit, mit der sich der Massepunkt auf der Kreisbahn bewegt ergibt sich:

$$v = r \cdot \omega \quad (2.18)$$

Somit gilt für die kinetische Energie des Massepunktes:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} m \cdot (r \cdot \omega)^2 \quad (2.19)$$

In Gleichung 2.26 findet sich das Massenträgheitsmoment wieder. Das Massenträgheitsmoment, oder kurz Massenträgheit beschreibt den Widerstand eines Körpers gegen die Änderung seiner Winkelgeschwindigkeit und wird mit dem Buchstaben  $J$  abgekürzt.

$$J = m \cdot r^2 \quad (2.20)$$

Somit ergibt sich für die kinetische Energie einer Masse, bei einer rotatorischen Bewegung.

$$E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (2.21)$$

Ein ausgedehnter Körper besitzt an jeder Stelle die gleiche Winkelgeschwindigkeit, jedoch nicht zwingen den gleichen Abstand  $r$  zur Drehachse. Somit ergibt sich die Gesamtenergie für einen ausgedehnten Körper aus der Summe jeder einzelnen Energie des Masseteils. (Sterner, et al., 2017 S. 551-552)

$$E_{rot} = \frac{1}{2} (\sum_{i=1}^n (\Delta m_i \cdot r_i^2)) \cdot \omega^2 \quad (2.22)$$

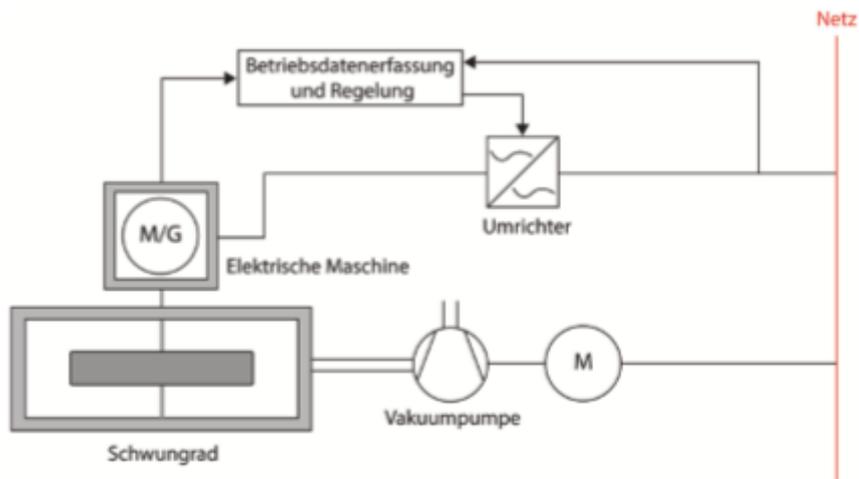


Abbildung 2.13: Aufbau eines Schwungradspeichers (Sternner, et al., 2017)

Hauptbestandteil des Speichers ist der Rotor, dieser dient als Energieträger bei einem Schwungradspeicher. Der Rotor wird beim Laden des Speichers über eine elektrische Maschine in Rotation versetzt, und haltet diese in Form von Bewegungsenergie. Die elektrische Maschine wird über das Stromnetz gespeist und dient als Energiewandler. Beim Entladen kann der gleiche Energiewandler genutzt werden, jedoch wird dieser jetzt im Generatorbetrieb verwendet, umso die kinetische Energie in elektrische Energie zurück zu wandeln. Das Laden und Entladen geschieht im gleichen Sektor, daher gehören die Schwungradspeicher ebenfalls zu den sektoralen Energiespeichern. (Sternner, et al., 2017 S. 559)

Die meisten Schwungradspeicher, die sich im Betrieb befinden haben einen Rotor aus Stahl. Rotoren aus Stahl weisen eine sehr geringe Energiedichte auf, da sie aufgrund ihrer hohen Masse bei schon geringen Winkelgeschwindigkeiten ihre Zugfestigkeit überschreiten. Mit der Entwicklung von Faserverbundstoffen können Rotoren mit weit höheren Umfangsgeschwindigkeiten betrieben werden. So besitzt ein Rotor aus CFK eine 15-mal höhere Energiedichte, als ein Rotor aus Stahl auf. Schwungradspeicher, mit einem Rotor aus Stahl haben eine Energiedichte von ca.  $20 \text{ kWh/m}^3$ . (Sternner, et al., 2017 S. 42,552)

Die maximale Energie, die ein Speicher aufnehmen kann, wird durch die maximale zulässige Drehzahl begrenzt, diese ist im Prinzip eine Materialeigenschaft, da bei zu hohen Drehzahlen die Zentrifugalkraft so groß wird, dass das Material versagt und es zum Totalschaden kommt. (Sternner, et al., 2017 S. 554)

Das Entladen geschieht nicht bis zum kompletten Stillstand des Rotors, sondern nur bis zu einer bestimmten Untergrenze. Die Energiedifferenz bestimmt die vorhandene Nutzenergie. (Koeppen, 2018 S. 26)

$$E_{Nutz} = \frac{1}{2}J(\omega_N^2 - \omega_U^2) \quad (2.23)$$

| Material | Zugfestigkeit<br>in N/mm <sup>2</sup> | Dichte<br>in kg/m <sup>3</sup> | spez. Festigkeit<br>in kNm/kg | max. Umfangsge-<br>schwindigkeit in m/s | mögliche Energie-<br>dichte in kJ/kg |
|----------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------------|
| Stahl    | 1.300                                 | 7.800                          | 167                           | 410                                     | 106                                  |
| Titan    | 1.150                                 | 5.100                          | 225                           | 570                                     | 143                                  |
| GFK      | 1.300                                 | 1.900                          | 680                           | 820                                     | 335                                  |
| CFK      | 6.300                                 | 1.546                          | 2.470                         | 1.570                                   | 1.570                                |

Abbildung 2.14: Rotoreigenschaften unterschiedlicher Materiale (Sterner, et al., 2017)

Aufgrund der hohen Drehzahlen, die ein Schwungradspeicher erreicht, muss der Rotor entsprechend gut gelagert werden. Die Lager müssen imstande sein, neben dem Gewicht und hohen Belastungen mögliche Unwuchten sowie Kreiselmomente auszugleichen sowie die Reibverluste so gering wie möglich zu halten, um einen guten Wirkungsgrad zu erreichen. Neben Wälz- und Gleitlager kommen in einigen Ausführungen auch Magnetlager zum Einsatz. Magnetlager sind in der Lage den Rotor berührungslos anhand von magnetischen Kräften zu lagern, und somit die Reibverluste zu minimieren. Um die Verlustleistung durch Selbstentladung zu verringern, wird der Rotorraum evakuiert, mittels einer Vakuumpumpe. Bei sehr hohen Drehzahlen können hohe Reibverluste zwischen der Luft und den rotierenden Flächen entstehen. Durch das Vakuum können so die Verluste weiterhin minimiert werden. Unter diesen Voraussetzungen besitzen Schwungradspeicher einen Wirkungsgrad von 83-93%, und sind vor allem als Kurzzeitspeicher sehr effizient. (Sterner, et al., 2017 S. 557)

Der Schwungradspeicher hat eine Zugriffszeit von wenigen Millisekunden, und kann daher seine Leistung direkt bei Bedarf zur Verfügung stellen. (Koeppen, 2018 S. 26)

### 2.5.3 Kondensator

Die Energiespeicherung in einem Kondensator beruht auf der Aufrechterhaltung eines elektrischen Feldes. Die einfachste Bauform eines Kondensators ist der Plattenkondensator, dieser besteht aus zwei parallelen Elektroden, welche durch ein Dielektrikum getrennt sind. Schließt man den Kondensator an eine Spannungsquelle an, sammeln sich Ladungen mit unterschiedlicher Polarität auf den Oberflächen der Elektroden. Dies hat zur Folge, dass sich ein elektrisches Feld im Dielektrikum bildet. (Rummich, 2015 S. 196)

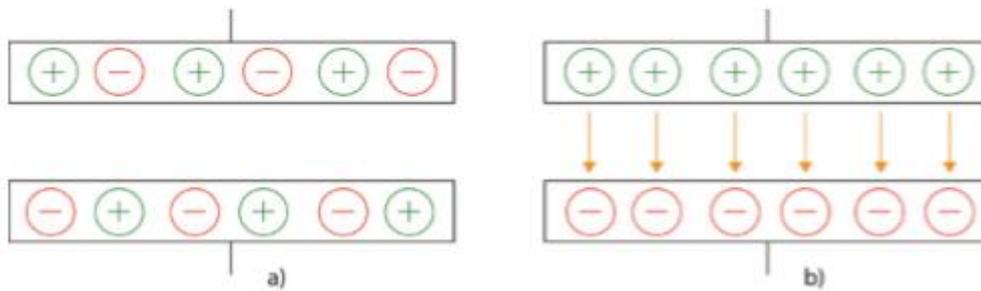


Abbildung 2.15: a) ungeladener Kondensator, b) geladener Kondensator (Sterner, et al., 2017)

Das Dielektrikum besteht aus einem nicht leitenden elektrischen Stoff, welcher einen Einfluss auf die elektrische Feldstärke hat. Die Feldbeeinflussung des elektrischen Feldes, durch das Dielektrikum wird anhand der Permittivität beschrieben.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (2.24)$$

Dabei setzt sich diese aus der absoluten Permittivität sowie der relativen Permittivität zusammen. Die absolute Permittivität beschreibt die Durchlässigkeit des Vakuums für elektrische Felder. Die relative Permittivität ist eine Materialeigenschaft und nimmt Werte größer oder gleich 1 an. (Sterner, et al., 2017 S. 197-198)

Die charakteristische Größe eines Kondensators ist die elektrische Kapazität, sie beschreibt wieviel Ladung auf den Elektroden gespeichert werden kann und wird in der Einheit Farad angegeben. Die Kapazität kann durch die Wahl eines Dielektrikums mit hoher Permittivität erhöht werden. Des Weiteren hängt die Kapazität von der Geometrie der Elektroden ab. Durch die Vergrößerung der Kondensatorplatten, und die Anordnung in einem kleineren Abstand, kann die Kapazität ebenfalls vergrößert werden. (Sterner, et al., 2017 S. 198-199)

$$C = \frac{Q}{U} = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (2.25)$$

Die gespeicherte Energie lässt sich aus der Spannung und der Ladungsänderung bestimmen.

$$dW = u \cdot i \, dt \quad (2.26)$$

Beim Lade- und Entladevorgang sind Spannung und Strom zeitabhängige Größen, sie sind nicht über den ganzen Vorgang konstant. Die Ladungsänderung führt zu einer Spannungserhöhung.

$$i \cdot dt = C \cdot du \quad (2.27)$$

Somit ergibt sich für den Energieinhalt: (Sterner, et al., 2017 S. 199)

$$dW = C \cdot u \cdot du \quad (2.28)$$

$$W = \int_0^U C \cdot u \cdot du = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (2.29)$$

Um Kondensatoren effektiv als Energiespeicher nutzen zu können, benötigen sie eine hohe Kapazität. Einfache Plattenkondensatoren haben relativ geringe Kapazitätswerte und können daher nicht viel Energie speichern. Sogenannte Doppelschichtkondensatoren können weitaus höhere Kapazitäten erreichen und sind somit als Energiespeicher besser geeignet. Der Grund für die hohen Kapazitätswerte liegt in der elektrochemischen Doppelschicht, auch Helmholtz-Schicht genannt, welche sich an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt bildet. An der Grenzfläche lagern sich Ladungen entgegengesetzter Polarität, mit sehr geringem Abstand an, und bilden so einen Kondensator ohne Dielektrikum. Um sehr große Oberflächen zu erzeugen, werden Elektroden aus einem porösen Material hergestellt. So besitzen Doppelschichtkondensatoren eine Energiedichte von ca. 10 kWh/m<sup>3</sup> (Sterner, et al., 2017 S. 41). (Rummich, 2015 S. 197)

Bei Kondensatoren erfolgen die Energiewandlungsprozesse sowie der Energiespeicherprozess in einem Bauteil. So hat dies vor allem Vorteile in Bezug auf die Effizienz, so können Kondensatoren einen Wirkungsgrad von bis zu 96% erreichen. Die elektrische Energie wird direkt an der Elektrode in chemische Energie gewandelt. Da die gespeicherte Energie in chemischer Form vorliegt, werden Doppelschichtkondensatoren den elektrochemischen Energiespeichern zugeordnet. (Sterner, et al., 2017 S. 26)

Wird der Kondensator geladen, muss dieser über eine Spannungsquelle verbunden werden. Der Ladeverlauf eines Kondensators entspricht einem exponentiellen Verlauf und wird über folgende Gleichung ausgedrückt:

$$U_c(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.30)$$

Dabei entspricht  $\tau$  der Zeitkonstante, sie setzt sich aus der Kapazität und dem Widerstand zusammen.

$$\tau = R \cdot C \quad (2.31)$$

Für eine Ladezeit, die der Zeitkonstante entspricht, lädt sich der Speicher auf genau 63,2% der Quellspannung auf. Um den Speicher auf 100% zu laden, benötigt es eine Dauer von  $5\tau$ . Die Zeitkonstante bestimmt somit die Ladezeit des Kondensators.

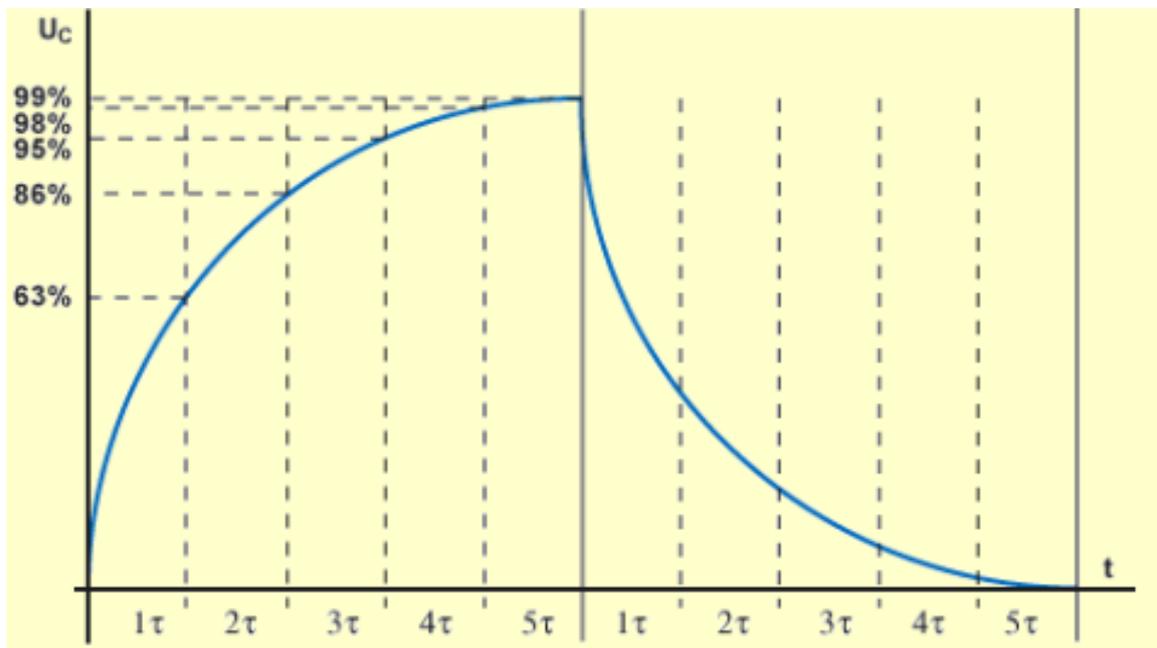


Abbildung 2.16: Lade- und Entladekurve eines Kondensators (curtsoft, 2019)

Theoretisch würde der Kondensator immer nach  $5\tau$  die gleiche Spannung einnehmen wie die an der Spannungsquelle, jedoch werden diese für eine bestimmte Nennspannung ausgelegt, die nicht überschritten werden darf. Um die Gesamtspannung der Kondensatoren zu erhöhen können mehrere einzelne in Reihe geschaltet werden. Durch die Reihenschaltung addieren sich die einzelnen Spannungen, verringern jedoch gleichzeitig die gesamte Kapazität.

$$U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (2.32)$$

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2.33)$$

Kondensatoren können, im Gegensatz zu einigen anderen Speichern komplett entladen werden, sodass ihre gesamte gespeicherte Energie als Nutzenergie zur Verfügung steht, zu dem besitzen sie gleichzeitig eine geringe Zugriffszeit von nur einigen Millisekunden. (Koeppen, 2018 S. 59)

## 3 Auswahl eines geeigneten Energiespeichers

### 3.1 Anforderungen an den Speicher

Um einen geeigneten Speicher auswählen zu können, müssen zuvor die Anforderungen, die durch die Anwendung im Smart Grid gegeben sind, bestimmt werden. Anhand dessen, kann im nächsten Schritt durch Vergleich der verschiedenen Eigenschaften, der unterschiedlichen Speicherarten der geeignetste Speicher ausgewählt werden.

- Es muss ein sektoraler Energiespeicher sein, die gespeicherte Energie muss in elektrischer Form beim Ein- und Ausspeichern vorliegen.
- Laut Versuchsablauf ändern sich alle zwei Minuten die Bedingungen für das Smart Grid, so kann es sein, dass der Speicher ebenfalls in diesem Zyklus zwischen Laden und Entladen wechseln muss. So muss der Speicher, nach einer angemessenen Dauer seine Leistung zur Verfügung stellen. Somit sollte die Zugriffszeit nicht zu hoch sein.
- Die Größe eines Speichers wird maßgeblich über die Energiemenge, die in ihm gespeichert werden soll, bestimmt. Speicher mit einer geringen volumetrischen Energiedichte fallen somit größer aus, als welche mit hoher Energiedichte.
- Die nicht nutzbare Restenergie hat ebenfalls Einfluss auf die Größe des Speichers, da die Dimensionierung immer nach der Nutzenergie erfolgt. Daher sollte der Restenergieanteil so gering wie möglich ausfallen.
- Der gesamte Versuch hat eine Dauer von 24 Minuten. Der Speicher muss in der Lage sein, die in ihm gespeicherte Energie für diese Dauer zu halten. Dementsprechend dürfen die Verluste durch Selbstentladung nicht hoch ausfallen.
- Wie bei jedem Projekt sind die Kosten, die entstehen nicht zu vernachlässigen. Zwar wurde kein konkreter Betrag im Vorfeld festgelegt, so muss jedoch Nutzen und Kosten stets in guter Relation zu einander stehen. So kann eine bestimmte Speicherart am idealsten geeignet sein, wenn jedoch die Kosten zu hoch ausfallen, kann dies ein Ausschlusskriterium sein.

### 3.2 Auswahl der Speicherart

Die Eigenschaften der verschiedenen Speicherarten wurden im Kapitel 2.5 erläutert, und können jetzt untereinander verglichen werden. Dabei wird in jeder Kategorie, für den Speicher, der die Anforderungen am meisten erfüllt 3 Punkte vergeben, für den nächst besten 2 Punkte, und für den schlechtesten 1 Punkt.

|                     | Pumpspeicher | Kondensator | Schwungradspeicher |
|---------------------|--------------|-------------|--------------------|
| Sektoraler Speicher | 3            | 3           | 3                  |
| Zugriffszeit        | 1            | 3           | 2                  |
| Energiedichte       | 1            | 2           | 3                  |
| Restenergie         | 2            | 3           | 1                  |
| Selbstentladung     | 3            | 2           | 1                  |
| Kosten              | 2            | 3           | 1                  |
| Gesamtpunkte        | 12           | 16          | 11                 |

Abbildung 3.1: Punkteverteilung der Energiespeicher in den einzelnen Kategorien

Nach dem Vergleich der einzelnen Speicherarten, anhand der festgelegten Kriterien stellt sich der Kondensator als am besten geeigneten Speicher dar.

### 3.3 Dimensionierung des Speichers

Um eine Aussage über die Dimensionierung des Kondensators treffen zu können, muss der Versuchsablauf genauer untersucht werden. Anhand der eingespeisten Leistung der Energieanlagen, sowie der erforderlichen Leistung an der Last, lässt sich das Leistungsdefizit berechnen, die der Speicher zur Verfügung stellen muss.

$$P_{PV} + P_{Wind} - P_{Last} = P_{Speicher} \quad (3.1)$$

Ist die sich ergebende Leistung positiv, kann diese Leistung dem Speicher zugeführt werden, ist sie negativ muss der Speicher diese Leistung ins Netz einspeisen. Da sich im Verlauf des Versuches die Vorgaben für die Energieanlagen, und damit die sich ergebende Leistung ändert, muss für jede dieser Situationen, bei den unterschiedlichen Laststufen die Leistung ausgemessen werden.

|           | Motor + 2 Lampen | 1 Lampe       | 2 Lampen      |
|-----------|------------------|---------------|---------------|
| Windstufe | Leistung [mW]    | Leistung [mW] | Leistung [mW] |
| 1         | 0                | 0             | 0             |
| 2         | 0                | 0             | 0             |
| 3         | 0                | 0             | 0             |
| 4         | 0                | 0             | 0             |
| 5         | 0                | 0             | 0             |
| 6         | 0                | 0             | 0             |
| 7         | 0                | 0             | 0             |
| 8         | 0                | 22            | 38            |
| 9         | 59               | 58            | 56            |
| 10        | 82               | 74            | 86            |
| 11        | 103              | 91            | 108           |
| 12        | 121              | 108           | 129           |

Abbildung 3.2: Leistungsmessung der Windenergieanlage

|                     | Motor + 2 Lampen | 1 Lampe       | 2 Lampen      |
|---------------------|------------------|---------------|---------------|
| Einstrahlwinkel [°] | Leistung [mW]    | Leistung [mW] | Leistung [mW] |
| 0                   | 286              | 339           | 317           |
| 15                  | 253              | 303           | 276           |
| 30                  | 239              | 273           | 251           |
| 45                  | 212              | 241           | 215           |
| 55                  | 184              | 209           | 183           |

Abbildung 3.3: Leistungsmessung der PV-Anlage

| Lastsituation   | Leistung [mW] |
|-----------------|---------------|
| 1 Lampe         | 152           |
| 2 Lampen        | 297           |
| 2Lampen + Motor | 342           |

Abbildung 3.4: Leistungsaufnahme der einzelnen Lasten bei 3V

Anhand des vorgegebenen Tagesganges kann zu jedem Zeitpunkt, den Verbrauchern sowie Erzeugern einen Leistungswert zugeordnet werden. Aus der Gesamtheit kann der Leistungsverlauf des Smart Grids dargestellt werden.

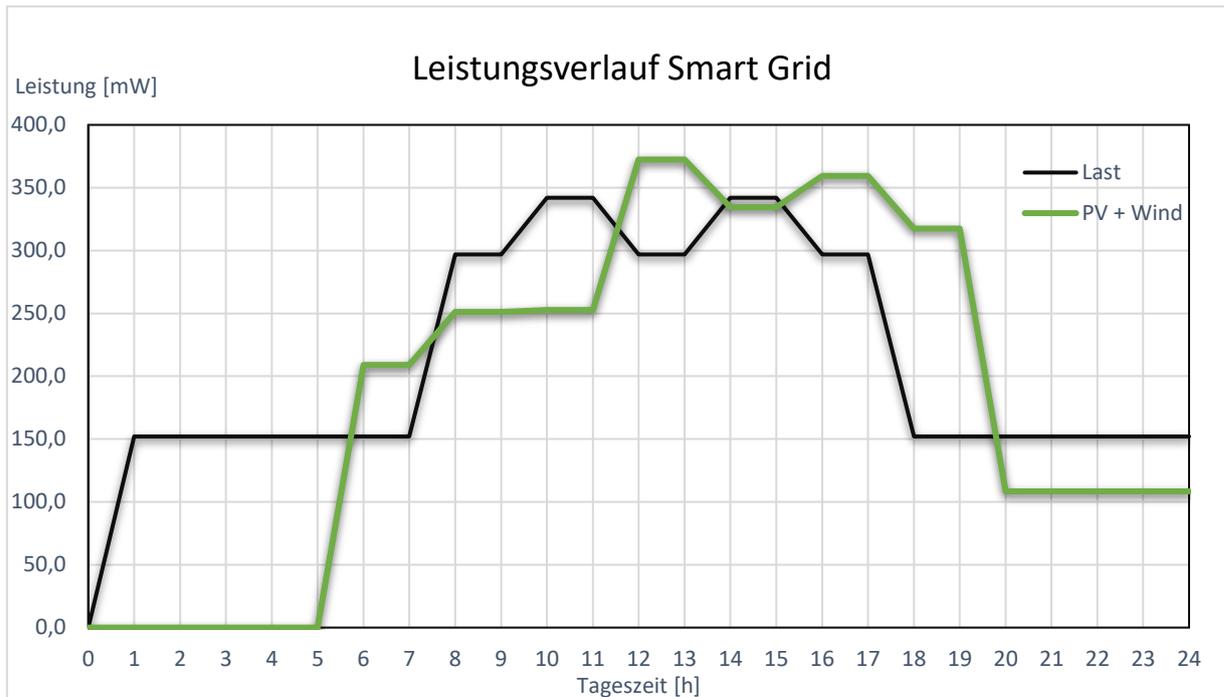


Abbildung 3.5: Leistungsverlauf des Smart Grids

Die grün dargestellte Kurve zeigt die eingespeiste Leistung durch die PV-Anlage sowie der Windenergieanlage an, die schwarze Kurve zeigt den Leistungsbedarf der Last. Die Differenz der Leistungen entspricht der Leistungsaufnahme bzw. Leistungsabgabe durch den Speicher. Die maximale Leistungsabgabe besteht zwischen 1 und 5 Uhr. In dieser Zeit muss der Speicher die Last vollkommen allein versorgen, da keine Solar- oder Windenergie zur Verfügung steht. Ab 5 Uhr speisen die Energieanlagen ebenfalls Leistung ein, sodass sich für den restlichen Verlauf eine abwechselnde Leistungsaufnahme sowie Entnahme einstellt. Die maximale Leistungsaufnahme geschieht in der Zeit zwischen 18 und 19 Uhr.

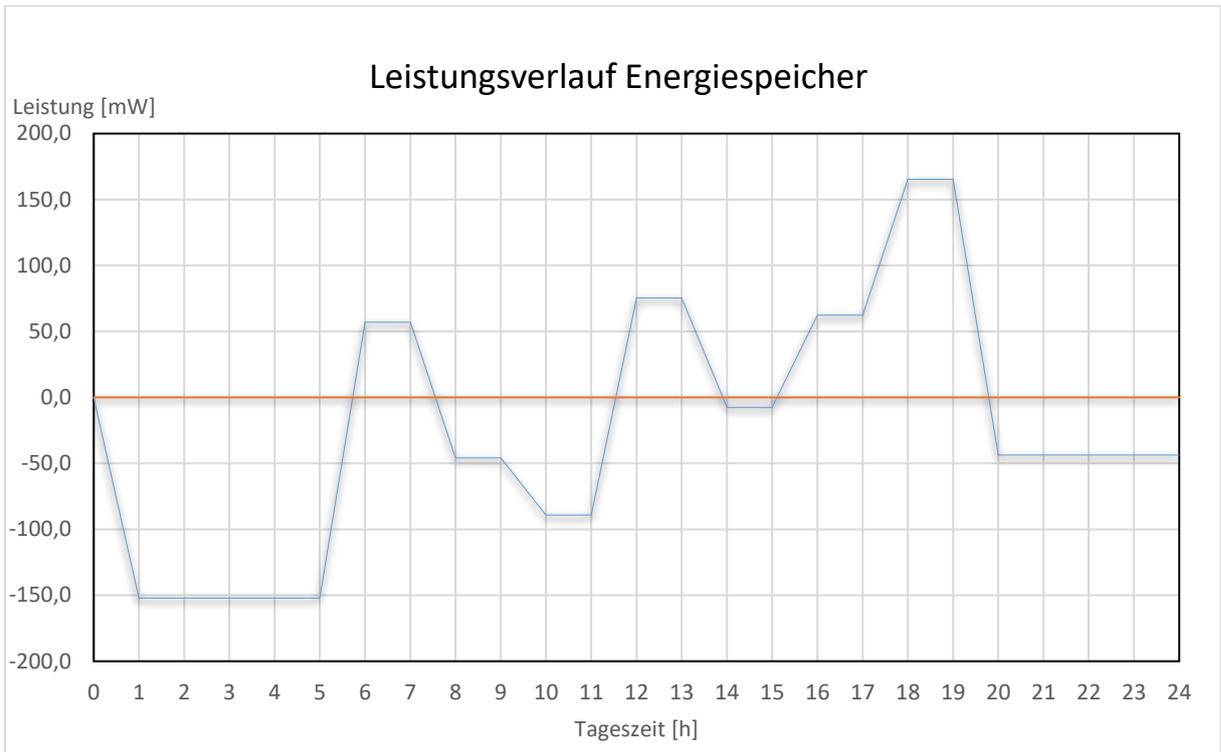


Abbildung 3.6: Leistungsverlauf des Energiespeichers

Abbildung 3.6 beschreibt den Leistungsverlauf am Speicher. Für die Auslegung der Kapazität des Kondensators ist jedoch Energiemenge relevant, diese ergibt sich aus dem Integral, über der Zeit des Leistungsverlaufs.

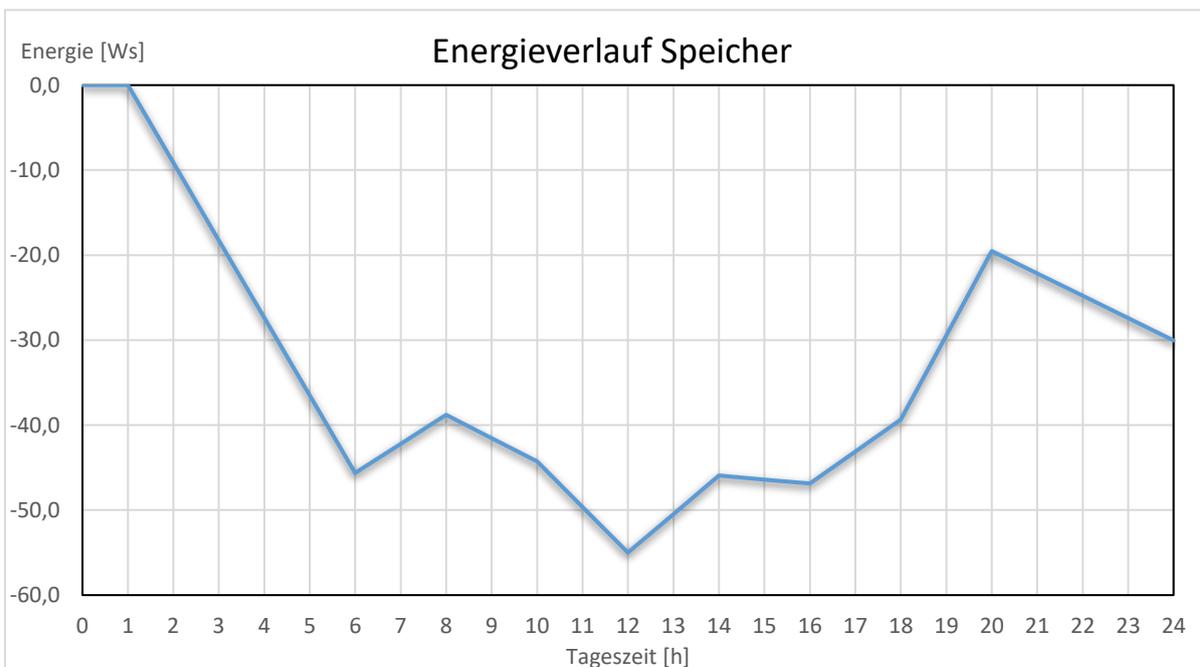


Abbildung 3.7: Energieverlauf des Speichers

Der Speicher wird in der ersten Hälfte des Versuchs überwiegend entladen, daher würde der Ablauf mit einem voll entladenen Speicher nicht funktionieren. Die Anfangsenergiemenge muss mindestens 55Ws betragen, damit der Versuchsablauf theoretisch machbar wäre, jedoch ist es sehr wahrscheinlich, dass es bei der Leistungsmessung zu einigen Messungenauigkeiten gekommen ist. Für die Messungenauigkeiten wird eine Abweichung von 10% angenommen.

Weiterhin darf die Spannung am Kondensator nicht unter 3V sinken, da ansonsten kein Entladen, aufgrund der höheren Spannung an der Last möglich wäre. So verbleibt eine bestimmte Menge an Restenergie, die nicht nutzbar ist im Speicher über. Diese lässt sich prozentual über den Quotienten der Energiemenge bei 3V zur Gesamtenergie bei Nennspannung ermitteln. Die Nennspannung des Kondensators wurde auf 6,9V festgelegt.

$$\frac{E_{3V}}{E_{ges}} = \frac{0,5 \cdot C \cdot U^2}{0,5 \cdot C \cdot U_N^2} = \frac{U^2}{U_N^2} \quad (3.2)$$

$$\frac{E_{3V}}{E_{ges}} = \frac{(3V)^2}{(6,9V)^2} = 0,19 \quad (3.3)$$

Des Weiteren werden Kondensatoren mit einer bestimmten Toleranz hergestellt und können bis zu 10% von den Herstellerangaben abweichen, diese muss ebenfalls bei der Dimensionierung berücksichtigt werden.

Laut Versuchsbeschreibung soll der momentane Speicher, vor Versuchsbeginn auf eine Leerlaufspannung von 3,5V geladen werden, dass entspricht ungefähr 50% der maximalen Energiemenge, daher soll der neue Speicher ebenfalls nur auf 50% vorgeladen werden.

Ebenfalls muss der Wirkungsgrad mitberücksichtigt werden. Der Kondensator hat einen sehr guten Wirkungsgrad, jedoch müssen alle Verluste der zusätzlich verbauten Bauteile, in der Schaltung berücksichtigt werden. Diese sollten jedoch nicht allzu hoch ausfallen, sodass ein Gesamtwirkungsgrad von 80% angenommen wird.

Anhand dieser Faktoren kann die endgültige Gesamtenergie ermittelt werden.

$$E = 55Ws \cdot 1,10 \cdot 1,19 \cdot 1,10 \cdot 1,5 \cdot 1,2 = 143Ws \quad (3.4)$$

Durch Umstellen der Energiegleichung des Kondensators, lässt sich aus der gegebenen Gesamtenergie die mindest Kapazität, die der Speicher benötigt, errechnen.

$$C = \frac{2 \cdot E}{U^2} \quad (3.5)$$

Die sich daraus ergebende Gesamtkapazität beträgt 6F.

## 4 Umsetzung und Inbetriebnahme des Speichers

### 4.1 Funktionen

Einige Funktionen, die der neue Speicher zu erfüllen hat, ergeben sich aus den Defiziten des alten Speichers. So braucht es eine Möglichkeit den Speicher manuell zwischen Laden sowie Entladen steuerbar zu machen. Da der Kondensator eine höhere Spannung, als an der Last aufweist, kann der Strom nicht aus der Last in den Speicher fließen, daher ist eine Anbindung über einen DC-DC Wandler erforderlich, der die Spannung anhebt, um so ein Laden des Speichers möglich macht.

Der Speicher muss immer nur genau so viel Leistung aufnehmen, oder abgeben können wie gebraucht wird, daher muss die Möglichkeit gegeben sein, die Leistung des Speichers variable einzustellen.

Weiterhin soll die Grundlage für eine spätere Softwareansteuerung geschaffen werden. Dabei ist die Entwicklung dieser Software nicht Teil dieser Arbeit, sondern es soll nur, für die spätere Umsetzung dieser, die Voraussetzung geschaffen werden.

Für die visuelle Darstellung sollen zwei weitere Funktionen realisiert werden. Zunächst soll anhand einer optischen Anzeige der Ladezustand des Speichers angezeigt werden, sowie soll ein 3D-Druck erstellt werden. Der 3D-Druck hat keine technische Funktion, sondern soll nur auf das Gehäuse des Speichers angebracht werden.

Als Hilfsmittel soll ein Microcontroller, in Form eines Arduino zum Einsatz kommen. Die Arduino Plattform besteht aus einem Hardwareteil und einem Softwareteil. Der Hardwareteil besteht aus einem Microcontrollerboard mit mehreren digitalen sowie analogen Anschlüssen, auch Ports genannt. Anhand der Ports können unter anderem Daten oder Signale eingelesen werden oder auch elektrische Bauteile angesteuert werden. Die Steuerung der Ports erfolgt über die Arduino-Software, welcher durch eine USB-Schnittstelle mit dem Computer verbunden werden kann. Über die Softwareoberfläche kann der Arduino programmiert werden. (Brühlmann, 2012)

### 4.2 Umsetzung

Um den Aufbau des Speichers, sowie die Umsetzung der Funktionen anschaulicher zu verdeutlichen, wird dies anhand des elektrischen Schaltplans vorgenommen.

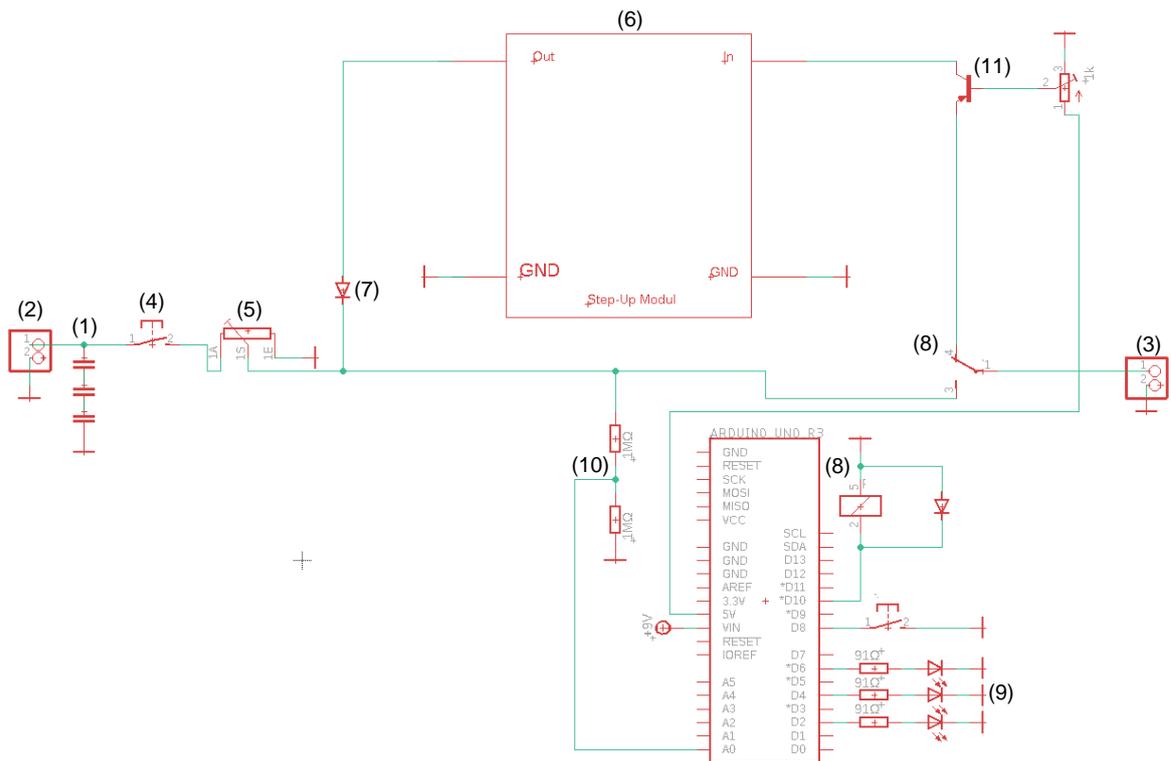


Abbildung 4.1: Elektrischer Schaltplan des Energiespeichers

Der Speicher besteht aus drei, in Reihe geschalteten Kondensatoren (1). Jede einzelne dieser hat eine Nennspannung von 2,3V und eine Kapazität von 20F. Die Reihenschaltung war nötig, damit eine ausreichend hohe Spannung vorhanden ist, somit ergibt sich eine Nennspannung von 6,9V bei einer Kapazität von 7,3F. Der Kondensator wurde in einer HPS-Box verbaut, und wird außerhalb des Gehäuses angebracht, so kann der Kondensator im Bedarfsfall ausgetauscht werden.

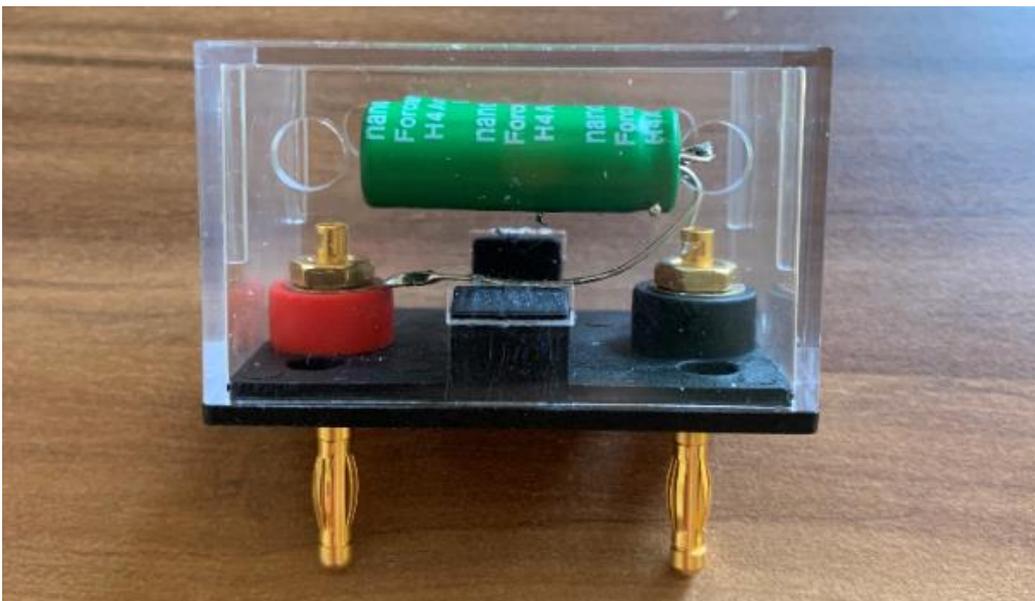


Abbildung 4.2: Reihenschaltung aus drei Kondensatoren in einer HPS-Box

Der Speicher besitzt zwei offene Anschlüsse. Der linke Anschluss (2) ist direkt mit dem Kondensator verbunden, und dient dazu, den Speicher, anhand einer externen Spannungsquelle auf eine gewünschte Ausgangskapazität zu laden.

Über den zweiten Anschluss (3) kann die Last des Smart Grids verbunden werden.

Damit keine Selbstentladung, beim Halten der Energie stattfindet, kann über einen Schalter (4) die elektrische Verbindung des Kondensators unterbrochen werden.

Das angeschlossene Potentiometer (5) ändert den ohmschen Widerstand der Schaltung. Durch ändern des Widerstandes lässt sie die Zeitkonstante des Kondensators ändern, was zu einer Änderung der Lade- sowie Entladeleistung führt.

Der DC-DC Wandler besteht aus einem Step-Up Modul (6), dieser wandelt, beim Laden des Speichers die niedrigere Eingangsspannung, in eine höhere Ausgangsspannung. Die Ausgangsspannung liegt bei 7,1V, also 0,2V über der Nennspannung des Kondensators, weil am Ausgang des Spannungswandlers noch eine Schottky-Diode (7) verbaut wurde, an der eine Spannung von 0,2V abfällt. Beim Entladen des Speichers sperrt die Diode den Strom in Richtung des Spannungswandlers.

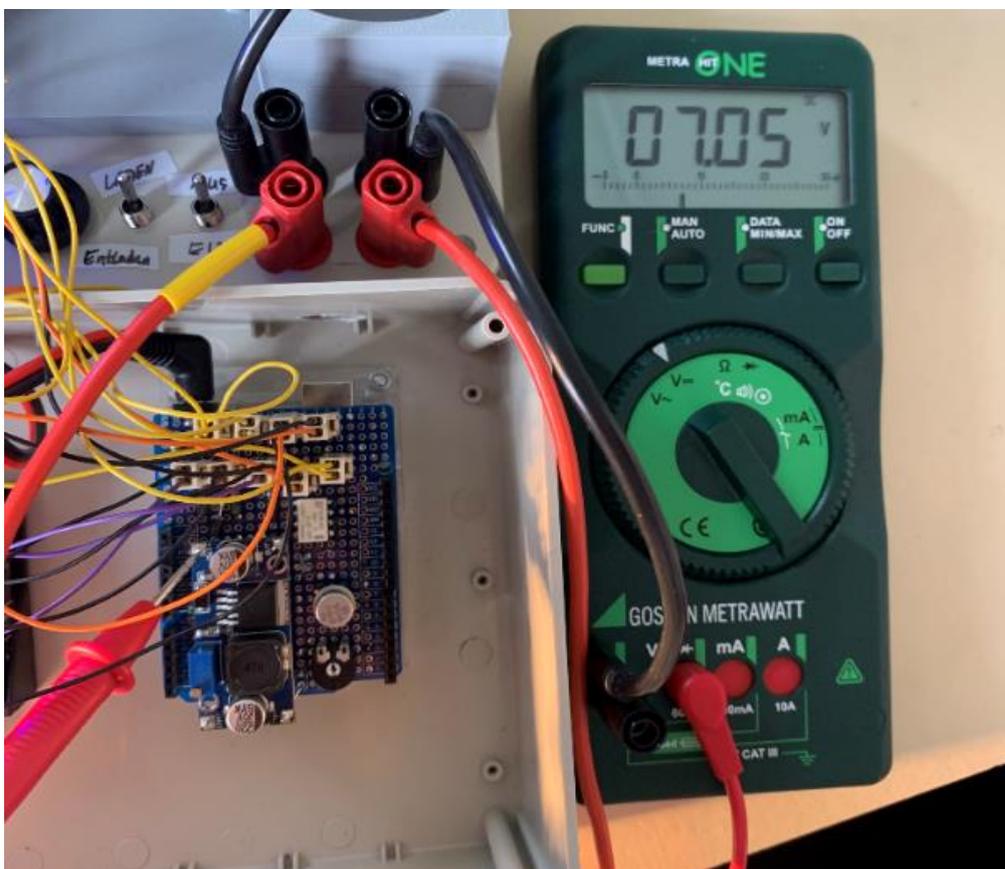


Abbildung 4.3: Spannungsmessung am Ausgang des Wandlers ohne Belastung

Am Eingang des Spannungswandlers wurde ein Transistor (11) verbaut. Der Spannungswandler, ohne Transistor führte beim Einschalten zu einem Spannungseinbruch an der Last, sodass beim Entladen die Spannung unterhalb der 3V sank. Der verbaute Transistor wurde so eingestellt, dass beim Entladen dies nicht geschehen kann. Sobald die Spannung am Emitter kleiner als 3V ist, sperrt der Transistor, jedoch hat das zur Folge, dass der Spannungswandler nicht optimal funktioniert. Die Ursachen werden in dem folgenden Kapitel genauer erläutert.

Um beim Laden des Kondensators, den Strompfad über den Spannungswandler zu führen, wird ein Relais (8) verwendet. Das Relais ist am digitalen Anschluss D10 des Arduinos verbunden. Die Umschaltung des Relais wird über einen Schalter, am digitalen Anschluss D8 getätigt. Über die Arduino Software wurde der digitale Anschluss D10 so programmiert, dass sobald der Schalter D8 geschlossen wird, eine Spannung auf den Anschluss D10 gegeben wird, und das Relais umschaltet. Beim Umschalten kann die die Selbstinduktion der Spule in dem Relais zu sehr hohen Spannungsspitzen führen, daher muss eine Freilaufdiode parallel zum Relais geschaltet werden.

Für die optische Anzeige des Ladezustands werden drei Leuchtdioden (9) verwendet. Je nach Ladezustand leuchten bei hoher Kapazität alle drei, bei mittlerer zwei, sowie bei geringer Kapazität nur eine der Dioden. Die Spannung am Kondensator wird über den analogen Anschluss A0 gemessen, dieser ist an einem Spannungsteiler (10) verbunden, da die analogen Anschlüsse des Arduinos nur eine maximale Spannung von 5V messen können. Der Spannungsteiler besteht aus zwei hochohmigen Widerständen, sodass durch diese nur sehr kleinen Ströme fließen, und keinen Einfluss auf die restliche Verschaltung hat. Je nachdem, wie hoch die gemessene Spannung ist, wird eine Spannung auf den einzelnen digitalen Anschlüssen, an dem die Leuchtdioden angeschlossen sind gegeben.

Für den Speicher wurde ein 3D-Modell mit CATIA erzeugt, und über einen 3D-Drucker gefertigt. Das 3D-Modell bildet einen Pumpspeicher ab und wurde auf das Gehäuse des Speichers angebracht. Die Leuchtdioden wurden am oberen Wasserbecken des Pumpspeichers eingebaut, und sollen den Wasserstand des Beckens darstellen.

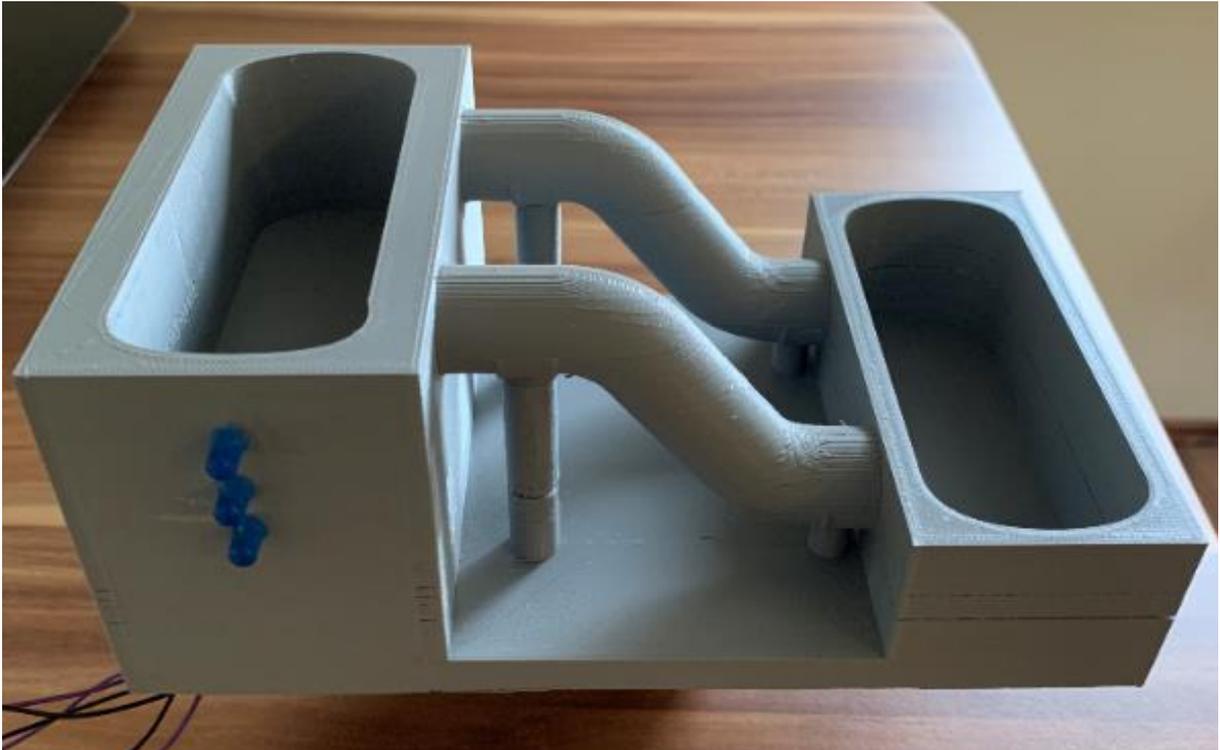


Abbildung 4.4: 3D-Druck des Pumpspeichers

Über die USB-Schnittstelle des Arduinos kann nicht nur die Programmierung der Software vorgenommen werden, sondern bietet ebenfalls die Möglichkeit für eine Computersteuerung. Der Arduino besitzt zwei feste Kanäle für das Einlesen und Ausgeben von Daten. Mit einem Monitoring Programm könnte so die Steuerung des Speichers über den Computer geschehen. Dafür müsste der Arduino vorher richtig programmiert werden, um die gewünschten Funktionen zu erfüllen.

Die Verschaltung wurde auf einem Arduino-Shield vorgenommen. Das Shield ist eine zusätzliche Platine, welches auf das Arduino-board aufgesteckt werden kann. Der wesentliche Vorteil des Shields besteht darin, dass die analogen und digitalen Anschlüsse direkt über die Platine verbunden werden können. Auf dieser können die einzelnen Komponenten angelötet und verbunden werden. Alle Komponenten, die nicht direkt auf der Platine verbaut sind, wurden mittels Steckverbindung und Kabel verbunden.

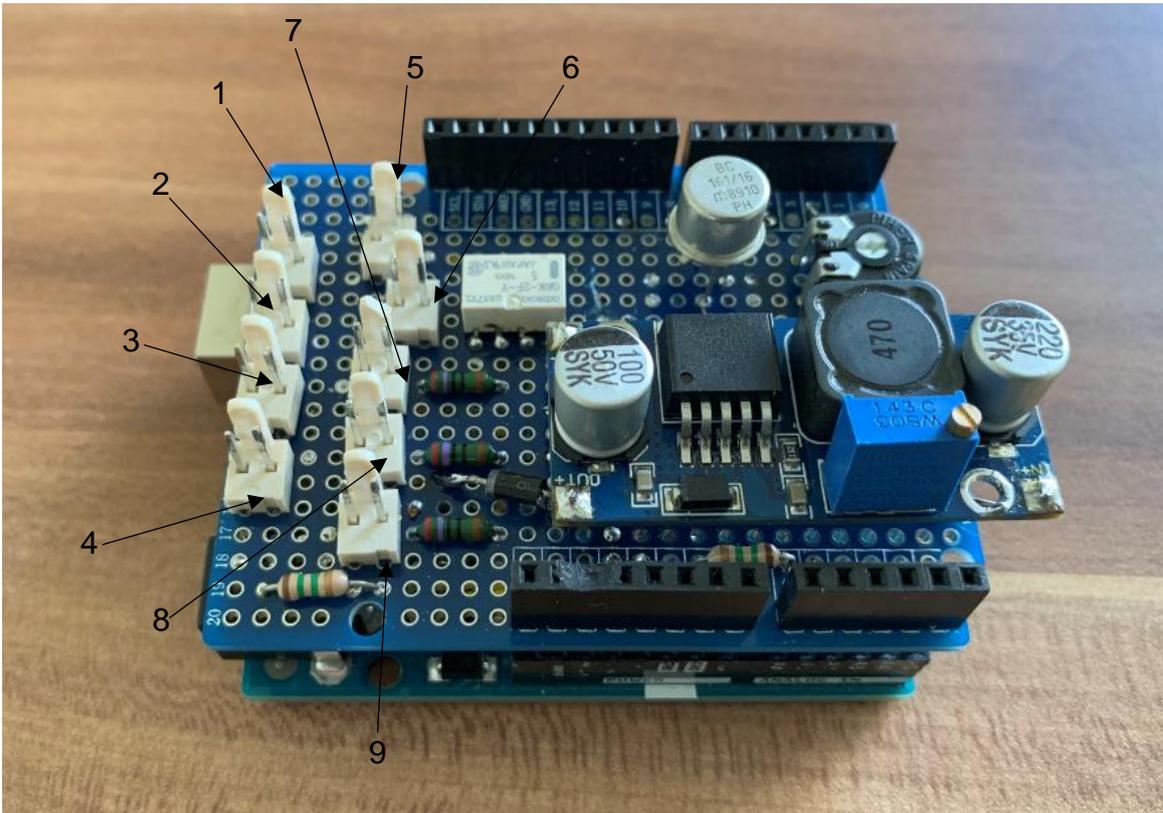


Abbildung 4.5: Verschaltung auf dem Arduino-Shield

| Nummer | Komponente                   |
|--------|------------------------------|
| 1      | Anschlussbuchse zum Aufladen |
| 2      | Kondensator                  |
| 3      | Ein / Aus Schalter           |
| 4      | Potentiometer                |
| 5      | Laden / Entladen Schalter    |
| 6      | Anschlussbuchse der Last     |
| 7      | Untere LED                   |
| 8      | Mittlere LED                 |
| 9      | Oberste LED                  |

Abbildung 4.6: Zuordnung der Steckverbindungen

Der fertig verbaute Speicher kann in Abbildung 4.7 betrachtet werden.



Abbildung 4.7: Fertig verbauter Energiespeicher

### 4.3 Inbetriebnahme und Test der Funktionen

Um den Speicher endgültig in Betrieb nehmen zu können, muss dieser vorher auf seine Funktionsfähigkeit geprüft werden. Dafür wird der neue Speicher in das Smart Grid eingebaut, und ersetzt den alten Energiespeicher. Über die offenen Anschlüsse lässt sich der Speicher einwandfrei auf eine gewünschte Kapazität vorladen. Das Entladen des Speichers funktioniert ebenfalls, über das Potentiometer lässt sich die gewünschte Leistung manuell einstellen, umso die gewünschte Spannung an der Last zu halten. Die Leuchtdioden zeigen bei einer Kondensatorspannung von 2V, 4V und 6V den Ladezustand des Speichers korrekt an. Wie schon im vorherigen Kapitel erwähnt, funktioniert das Laden des Speichers, über den DC-DC Wandler nur eingeschränkt. Im unbelasteten Zustand kann der Spannungswandler zwar die gewünschte Spannung am Ausgang liefern (siehe Abb. 4.3), sobald man jedoch den Speicher laden will, bricht diese unter Belastung auf 3,4V ein.

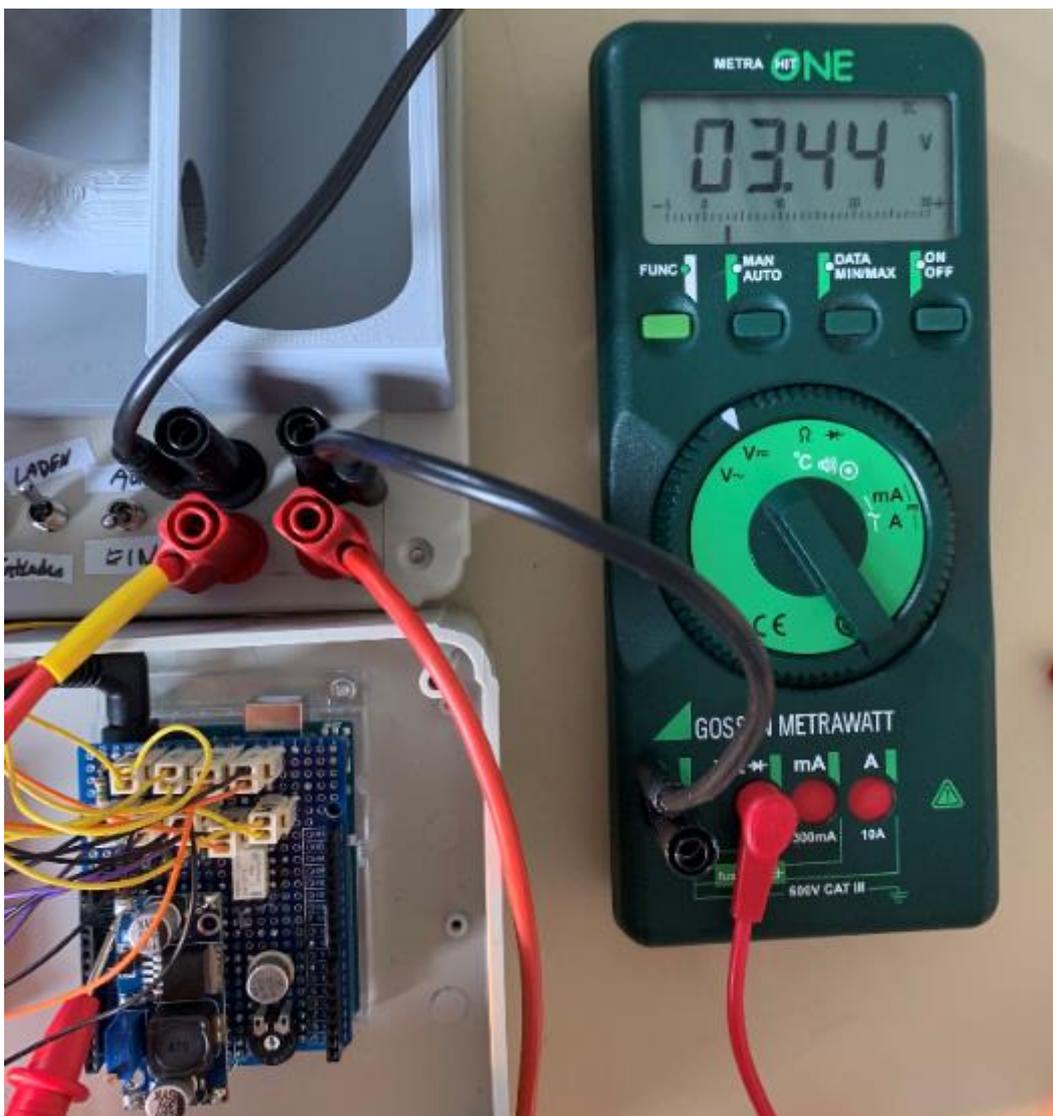


Abbildung 4.8: Spannungsmessung, am Ausgang des Wandlers unter Belastung

Dementsprechend ist die Möglichkeit, den Kondensator auf Nennspannung zu laden nicht gegeben. Testweise wurde der Speicher vom Smart Grid entkoppelt, um das Laden anhand einer externen Spannungsquelle, mit geringem Innenwiderstand zu überprüfen, was sich als erfolgreich herausstellte. Anhand dieser Erkenntnis lässt sich die Ursache auf die zu hohen Innenwiderstand des Smart Grids zurückführen.

Im Ladevorgang ist der Speicher, aus Sicht der Quelle ein zusätzlicher Verbraucher, der sich zu den vorhandenen Verbrauchern parallelschaltet. Bei offenem Schalter liefert die Spannungsquelle 4,5V, wobei 1V am Innenwiderstand der Quelle abfallen. Die Spannung an der Last ergibt sich aus der Differenz, somit 3,5V.

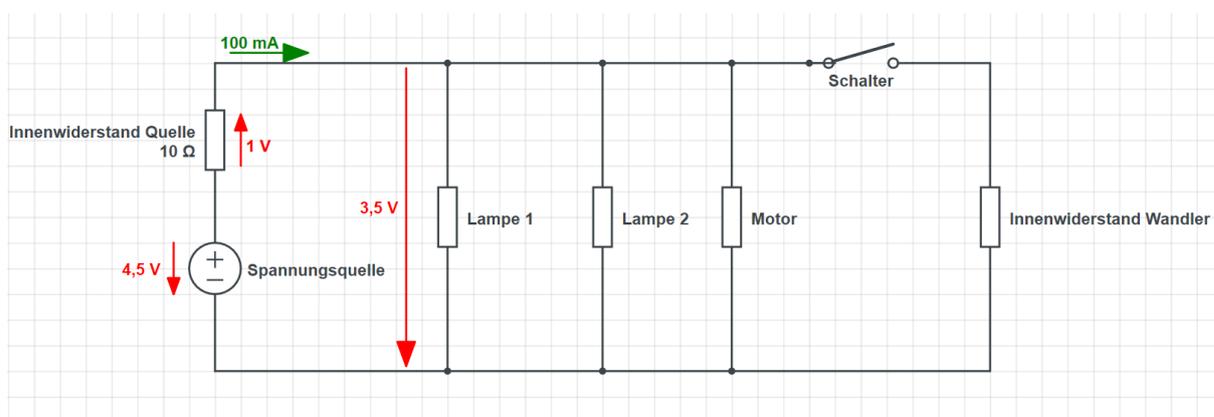


Abbildung 4.9: Veranschaulichung des Innenwiderstandsproblem ohne Wandler

Schließt man den Schalter, und möchte den Speicher über den Spannungswandler laden, erhöht sich der Strom. Laut dem Ohmsches Gesetz fällt somit eine höhere Spannung am Innenwiderstand der Quelle ab.

$$U = R \cdot I = 10\Omega \cdot 0,2A = 2V \quad (4.1)$$

Da es sich um ein niedrig ohmigen Spannungswandler handelt, braucht dieser im Einschaltzeitpunkt einen etwas höheren Strom, was jedoch das Smart Grid nicht liefern kann.

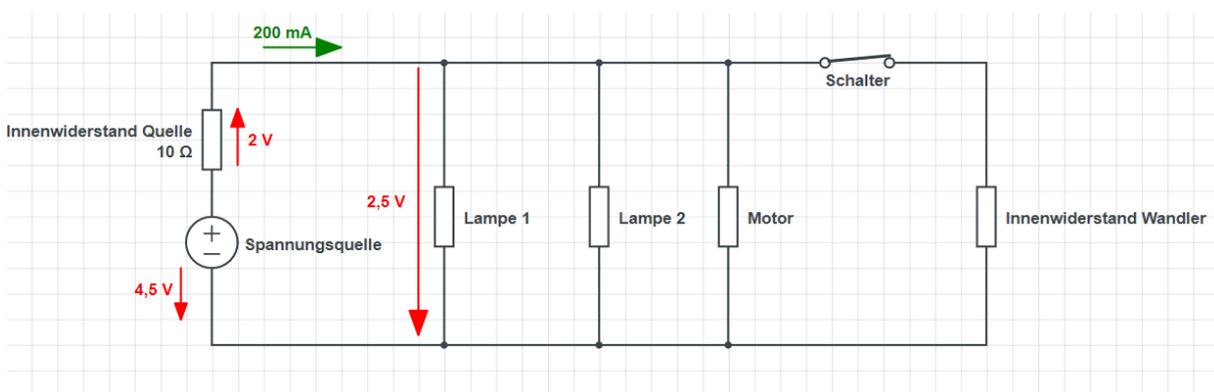


Abbildung 4.10: Veranschaulichung des Innenwiderstandsproblem mit Wandler

Aus zeitlichen Gründen war es nicht möglich einen neuen bzw. geeigneten Wandler zu konzipieren, daher wurde als zeitgerechte Lösung der Transistor verbaut.

Um die Auswirkung auf das Smart Grid beurteilen zu können, wurde dennoch der Versuchsablauf mit dem neuen Speicher durchgeführt.

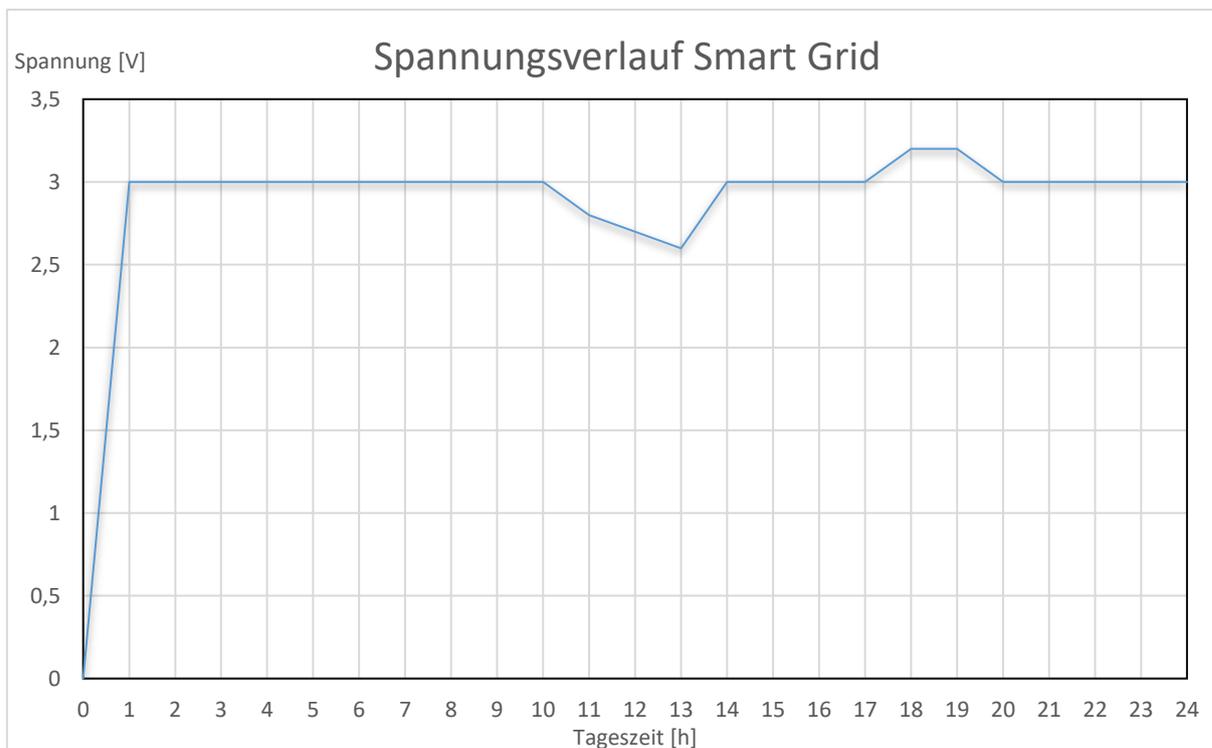


Abbildung 4.11: Spannungsverlauf der Last mit dem neuen Speicher

Vergleicht man den Verlauf, mit dem des alten Speichers, erkennt man zunächst einen stabileren Verlauf der Spannung. In der Zeit von 0 – 6 Uhr ist der Speicher als einzige Energiequelle im Netz vorhanden, sodass die Spannungserhaltung nur durch den Speicher gegeben wird. Besonders wichtig war es, dass die Kondensatorspannung in diesem Zeitraum niemals unter 3V sinken durfte. Wäre der Speicher unterdimensioniert, würde die Spannung beim Entladen unter die 3V sinken, was jedoch nicht der Fall ist. In dem Zeitraum von 10 – 14 Uhr zeigt sich ein geringer Spannungseinbruch an der Last. In der Zeit von 6 – 8 Uhr war genügend Leistung im Netz vorhanden, sodass der Speicher in diesen zwei Stunden geladen werden konnte. Da das Laden des Speichers nicht einwandfrei funktioniert, konnte der Speicher in diesem Zeitraum nur wenig Leistung aufnehmen. In dem Zeitraum von 10 – 14 Uhr kann der Speicher somit nicht genügend Leistung zur Verfügung stellen, was zu einem Spannungseinbruch führt. In der Zeit von 17 – 20 Uhr übersteigt die Spannung an der Last die 3V. Dieses ist ebenfalls, auf das schlechte Ladeverhalten des Speichers zurückzuführen. Der Speicher ist nicht in der Lage genügend Leistung aus dem Netz zu nehmen, was zu einer Spannungserhöhung führt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Auf Grundlage der vorgestellten Speicherarten wurde, nach einem Vergleich, in Hinsicht auf ihre individuellen Eigenschaften eine passende Speicherart für das Smart Grid ausgewählt. Anhand der anschließenden Dimensionierung konnte eine Aussage über die Speicherkapazität des Speichers für das Smart Grid Modell getroffen werden. Die geforderten Funktionen wurden mit dem Speichermodul verbaut und umgesetzt. Als Endprodukt dieser Arbeit kann somit ein funktionsfähiger Energiespeicher präsentiert werden. Auch wenn die Ladefunktion des Speichers nicht vollständig den Erwartungen entspricht, kann der Speicher als eine wesentliche Verbesserung zum Vorgänger angesehen werden.

Für die zukünftige Arbeit an dem Speicher müsste zunächst ein passender Spannungswandler konzipiert werden, welcher mit dem Smart Grid kompatibel ist, und für eine optimale funktionsfähige Ladefunktion des Speichers sorgt.

Um die Computeranbindung des Speichers zu realisieren, kann ein passendes Monitoring Programm geschrieben werden, über diese kann auch eine mögliche Steuerung, direkt über den Computer getätigt werden. Der verbaute Mikrocontroller bietet eine passende Grundlage dazu, es müsste dafür nur der Softwareteil erarbeitet werden.

## 6 Literaturverzeichnis

**Brühlmann, Thomas. 2012.** *Arduino Praxiseinstieg*. s.l. : mitp, 2012.

**curtsoft. 2019.** curtsoft. [Online] 10. September 2019.  
<http://www.curtsoft.de/wissen/Technik/Elektronik/Kondensator.htm>.

**Koepfen, Birgit. 2018.** *Elektrische Energieanlagen - Versuch 4 Smart Grid*. 2018.

**Koepfen, Birgit. 2018.** *Elektrische Energieanlagen Kapitel 4*. 2018.

**leXsolar. o.J.** *Professional, leXsolar-SmartGrid - Experimentierhandbuch*. o.J.

**Rummich, Erich. 2015.** *Energiespeicher - Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen*. s.l. : Expert Verlag, 2015.

**Sterner, Michael und Stadler, Ingo. 2017.** *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. s.l. : Springer Vieweg, 2017.

**Watter, Holger. 2018.** *Regenerative Energiesysteme - Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme*. s.l. : Springer Vieweg, 2018.

**Zahoransky, Richard. 2019.** *Energietechnik - Systeme zur konventionellen und erneuerbaren Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf*. s.l. : Springer Vieweg, 2019.



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

| <b>Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit</b>   |   |                          |
|---|---|--------------------------|
| Hiermit versichere ich,   |   |                          |
| Name:   | <input type="text" value="Amini"/>      |                          |
| Vorname:  | <input type="text" value="Omran"/>      |                          |
| dass ich die vorliegende <input type="text" value="Bachelorarbeit"/> bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:<br><input type="text" value="Entwicklung eines Speichers für ein Smart Grid Modell"/> |   |                          |
| ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.                                     |   |                          |
| <i>- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -</i>   |   |                          |
| Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der <input type="text" value="-bitte auswählen-"/> ist erfolgt durch:<br><input type="text"/>   |   |                          |
| <input type="text" value="Hamburg"/>  | <input type="text" value="19.09.2019"/> | <input type="text"/>     |
| Ort   | Datum                                   | Unterschrift im Original |