




# Studiengang Systemtechnik

Vertiefungsrichtung Power & Control

# Bachelorarbeit Diplom 2020

*Cina Nils*

*Untersuchung des Aufzugsversorgungssystems  
Einsetzen, Dimensionieren und Steuern eines  
Energiespeichers*

-  Dozent  
Dr. Phillipe Barrade
-  Experte  
Benoît Schmoutz
-  Datum der Abgabe des Schlussberichts  
14.08.2020

Filière / Studiengang <b>SYND</b>	Année académique / Studienjahr <b>2019/20</b>	No TD / Nr. DA <b>pc/2020/63</b>
Mandant / Auftraggeber <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input checked="" type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiant / Student <b>Nils Cina</b> Professeur / Dozent <b>Philippe Barrade</b>	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja <sup>1</sup> <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) <b>Benoît Schmoutz</b> Ascenseurs Menétrey SA, Route de la Condémine 10, 1680 Romont bschmoutz@menetrey-lift.ch	

Titre / Titel

**Untersuchung des Aufzugsversorgungssystems -  
Einsetzen, Dimensionieren und Steuern eines Energiespeichers**

Description / Beschreibung

Im Rahmen von Projekten zur Stromversorgung von Aufzügen startet die Hochschule Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Eines der Ziele ist das Einfügen von Akkumulatoren in die Lieferkette mit dem Ziel, die Energierückgewinnung zu maximieren. Ein zweites Ziel besteht darin, die maximale Wirkleistung im Netzwerk zu begrenzen. In extremen Fällen könnte ein solches Gerät nur mit Photovoltaikzellen betrieben werden.

Zweck dieses Projekts ist die Modellierung eines Aufzugs mit Echtzeit-Hardware-in-the-Loop-Simulatoren auf der Grundlage von Datensätzen aus Messungen. Aus dieser Aktivität müssen wir in der Lage sein, den Wirkungsgrad der Stromrichter zu optimieren und dann die Akkumulatoren, ihre Schnittstellenwandler und die Anpassungsstrategien gemäß den zu definierenden Kriterien zu dimensionieren. Schließlich sollte eine endgültige Validierung ermöglichen, festzustellen, ob ein solches Konzept bei schwachen Stromquellen gültig ist.

Objectifs / Ziele

- Analyse des Betriebs eines Aufzugs, Dokumentation, Analyse bereits durchgeführter Messungen.
- Implementierung eines Aufzugsmodells in einem Echtzeitsimulator: Umwandlungsstruktur, Steuerung, Steuerungsstrategien. Je nach verfügbarer Zeit wird die Steuerung direkt im Echtzeitsimulator oder auf der digitalen Plattform POETIC implementiert.
- Analyse der Größenkriterien für einen Akku. Analyse der Größenkriterien für einen Akku. Wahl der Technologie, Dimensionierung und Definition der Stromschnittstellen.
- Leistungsanalyse aus realen Fallstudien.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum

Responsable de l'orientation / filière  
Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:

.....F. Moghaddam.....

<sup>1</sup> Etudiant / Student :

.....Cina.N.....

Délais / Termine

Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags:  
**25.05.2020**Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation  
**Semaine / Woche 26** (22.06 – 26.06.2020)Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts:  
**14.08.2020, 12:00**Exposition / Ausstellung der Diplomarbeiten:  
**28.08.2020** (si autorisé / falls genehmigt)Défense orale / Mündliche Verfechtung:  
**Semaine / Woche 36** (31.08 – 04.09.2020)

<sup>1</sup> Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.  
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.

## Untersuchung des Aufzugsversorgungssystems

Diplomand Nils Cina

### Ziel des Projekts

Einsetzen, Dimensionieren und Steuern eines Energiespeichers in einem Aufzugsversorgungssystem.

### Methoden | Experimente | Resultate

In dieser Arbeit wird das Einsetzen eines Energiespeichers bei einem Aufzugsversorgungssystem untersucht. Dafür wurden eine Analyse und eine Modellierung eines elektromechanischen Aufzugsystems erstellt. Die Messungen wurden mit Matlab-Simulink und Typhoon HIL durchgeführt. Es wurden zwei verschiedene Schaltungen erstellt. In der ersten Schaltung befindet sich der Energiespeicher auf dem Gleichspannungsbus und in der zweiten Schaltung ist der Energiespeicher mit einem Wandler am Gleichspannungsbus angeschlossen. Da man mittels Simulationen und Dimensionierung des Energiespeichers herausgefunden hat, dass der Energiespeicher mit einem Wandler am Gleichspannungsbus besser geeignet ist, wurde dieser für die weiteren Simulationen verwendet. Die Auswahl der Technologie wurde mit dem Ragone Diagramm und anhand verschiedener Kriterien getroffen. Die Lösung für die zweite Schaltung sind Superkondensatoren. Die Schaltung wurde mit dem Echtzeitsimulator Typhoon HIL implementiert und getestet. Es konnte festgestellt werden, dass das Einsetzen eines Energiespeichers bei einem Aufzugsversorgungssystem funktioniert.

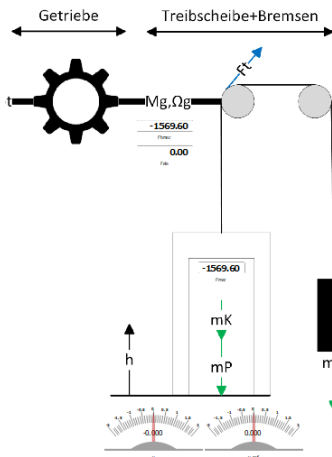
Diplomarbeit  
| 2020 |

Studiengang  
Systemtechnik

Anwendungsbereich  
Power & Control

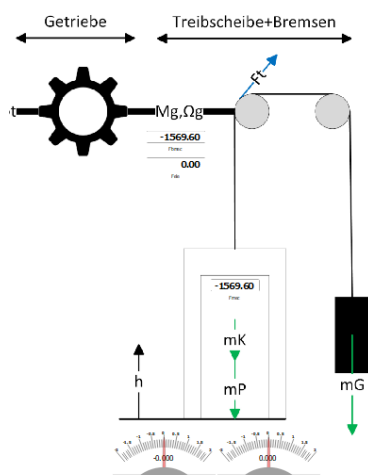
Verantwortlicher Dozent  
Dr. Philippe Barrade  
philippe.barrade@hevs.ch

Partner  
Benoît Schmoutz  
Ascenseurs Menétrey SA  
Route de la Condémine 10  
1680 Romont  
bschmoutz@menetrey-lift.ch



Typhoon HIL der Echtzeitsimulator

## Stockage d'énergie dans un système d'ascenseur



Travail de diplôme  
| édition 2020 |

Filière  
*Systèmes industriels*

Domaine d'application  
*Power & Control*

Professeur responsable  
*Dr. Philippe Barrade*  
[philippe.barrade@hevs.ch](mailto:philippe.barrade@hevs.ch)

Partenaire  
*Benoît Schmoutz*  
*Ascenseurs Menétrey SA*  
*Route de la Condémine 10*  
*1680 Romont*  
[bschmoutz@menetrey-lift.ch](mailto:bschmoutz@menetrey-lift.ch)

Diplômant Nils Cina

### Objectif du projet

Installation, dimensionnement et contrôle d'un dispositif de stockage d'énergie dans un système d'alimentation d'ascenseur.

### Méthodes | Expériences | Résultats

Cette thèse porte sur l'utilisation d'un dispositif de stockage d'énergie dans un système d'alimentation d'ascenseur. Une analyse et une modélisation d'un système d'ascenseur électromécanique ont donc été réalisées. Les mesures ont été effectuées avec Matlab-Simulink et Typhoon HIL. Deux circuits différents ont été créés. Dans le premier circuit, le stockage d'énergie se fait sur le bus DC et dans le second circuit, le stockage d'énergie est connecté au bus DC avec un convertisseur. Comme les simulations et le dimensionnement du stockage d'énergie ont montré que le stockage d'énergie avec un convertisseur sur le bus DC est plus approprié, il a été utilisé pour les simulations ultérieures. La technologie a été sélectionnée à l'aide du diagramme de Ragone et de divers critères. La solution pour le deuxième circuit sont les supercondensateurs. Le circuit a été mis en place et testé avec le simulateur en temps réel Typhoon HIL. Il a été constaté que l'insertion d'un dispositif de stockage d'énergie fonctionne dans le système d'alimentation électrique d'un ascenseur.



Typhoon HIL le simulateur en temps réel

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>3</b>
1.1	Ziele: .....	3
1.2	Vorgehensweise .....	3
<b>2</b>	<b>Analyse und Modellierung eines elektromechanischen Umwandlungssystems .....</b>	<b>4</b>
2.1.1	Dioden Gleichrichter .....	6
2.1.2	Spule .....	6
2.1.3	Glättungskondensator .....	6
2.1.4	Motor und Getriebe .....	7
2.1.5	Treibscheibe, Umlenkrolle und mechanische Bremse .....	9
2.1.6	Bremswiderstand .....	9
2.2	Regelung .....	10
2.2.1	Aufzug .....	10
2.2.2	Bremswiderstand .....	11
2.3	Geschwindigkeitsprofil eines Aufzugs .....	12
2.3.1	Geschwindigkeitsprofil mit Matlab-Simulink .....	13
2.4	Wirkungsgrad .....	14
2.5	Modell Simulink .....	15
<b>3</b>	<b>80 Fahrzyklen mit Simulink.....</b>	<b>16</b>
3.1.1	Leistung in Abhängigkeit des Wirkungsgrades .....	17
3.1.2	Energie in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad .....	17
3.1.3	Netzurückspeisung .....	18
<b>4</b>	<b>Auswertung bereits durchgeführter Messungen .....</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>ESS (Energie Speicher System) .....</b>	<b>21</b>
5.1	Technologie .....	21
5.1.1	Elektrochemische Speicher .....	23
5.1.2	Superkondensator .....	26
5.1.3	Batterien.....	26
5.2	Vordimensionierung .....	28
5.2.1	Aufzug Nr.1.....	28
5.2.2	Aufzug Nr.2.....	31
5.3	ESS auf dem Gleichspannungsbuss .....	33
5.3.1	Regelung.....	35
5.3.2	Strategie .....	35
5.3.3	Superkondensator auf dem DC Bus .....	36
5.3.4	Batterie auf dem DC Bus .....	38
5.4	Energiespeichersystem parallel auf dem Gleichspannungsbuss.....	39
5.4.1	Systemsteuerung.....	41
5.4.2	Strategie .....	41
5.4.3	Dimensionierung .....	42
<b>6</b>	<b>Typhoon HIL .....</b>	<b>46</b>
6.1	Modell Typhoon HIL .....	46

6.1.1	PI-Regler .....	47
6.1.2	Leistungsmessung .....	48
6.1.3	Panel.....	49
6.2	Messungen .....	51
6.3	Optimierung der Dimensionierung.....	53
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick.....</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>57</b>
<b>10</b>	<b>Unterschrift .....</b>	<b>57</b>

# 1 Einführung

Ein Aufzug verbraucht bei seinen Fahrten wie auch im Standby Modus Energie. In dieser Arbeit wird das Einsetzen eines Energiespeichers bei einem Aufzugsversorgungssystem untersucht.

Es gilt zu testen, wie die Energie vom Bremswiderstand in einem Energie Speicher System gespeichert werden kann. Für die Steuerung eines konventionellen Aufzugs werden im Wesentlichen drei Hauptbestandteile benötigt. Dies sind: das Stromnetz, ein Antrieb und ein Bremswiderstand. Das Stromnetz liefert die notwendige Energie damit der Antrieb den Aufzug bewegen kann. Mit dem Bremswiderstand wird die Energie verbraucht, welche der Aufzug erzeugt.

Diese Arbeit fokussiert sich auf die Stromversorgung von Aufzügen, mit dem Ziel mittels Energiespeicher die Energierückgewinnung zu maximieren, sowie die maximale Wirkleistung zu minimieren, damit ein Aufzug zum Beispiel mittels Photovoltaikzellen betrieben werden kann.

Die Modellierung des Aufzugs wird mit dem Echtzeitsimulator von Typhoon HIL validiert. Mit den Simulationen eines Echtzeitsimulators kommt man näher an die Realität als mit der Simulation von Computerprogrammen. Die Tests mit dem Echtzeitsimulator basieren auf Messungen und Datensätzen von realen Aufzügen. Mit diesen Grundlagen werden Energiespeicher und ihre Schnittstellenwandler anhand von definierten Kriterien dimensioniert. Schlussendlich wird mit einer bestimmten Energiemanagementstrategie das Konzept auf seine Funktionen und Machbarkeit überprüft.

## 1.1 Ziele:

- Analyse des Betriebs eines Aufzugs
- Analyse bereits durchgeführter Messungen
- Implementierung des Aufzugsmodells im Echtzeitsimulator
- Analyse der Grössenkriterien für einen Akku
- Wahl der Technologie
- Stromschnittstelle dimensionieren und definieren
- Leistungsanalyse aus Fallstudien

## 1.2 Vorgehensweise

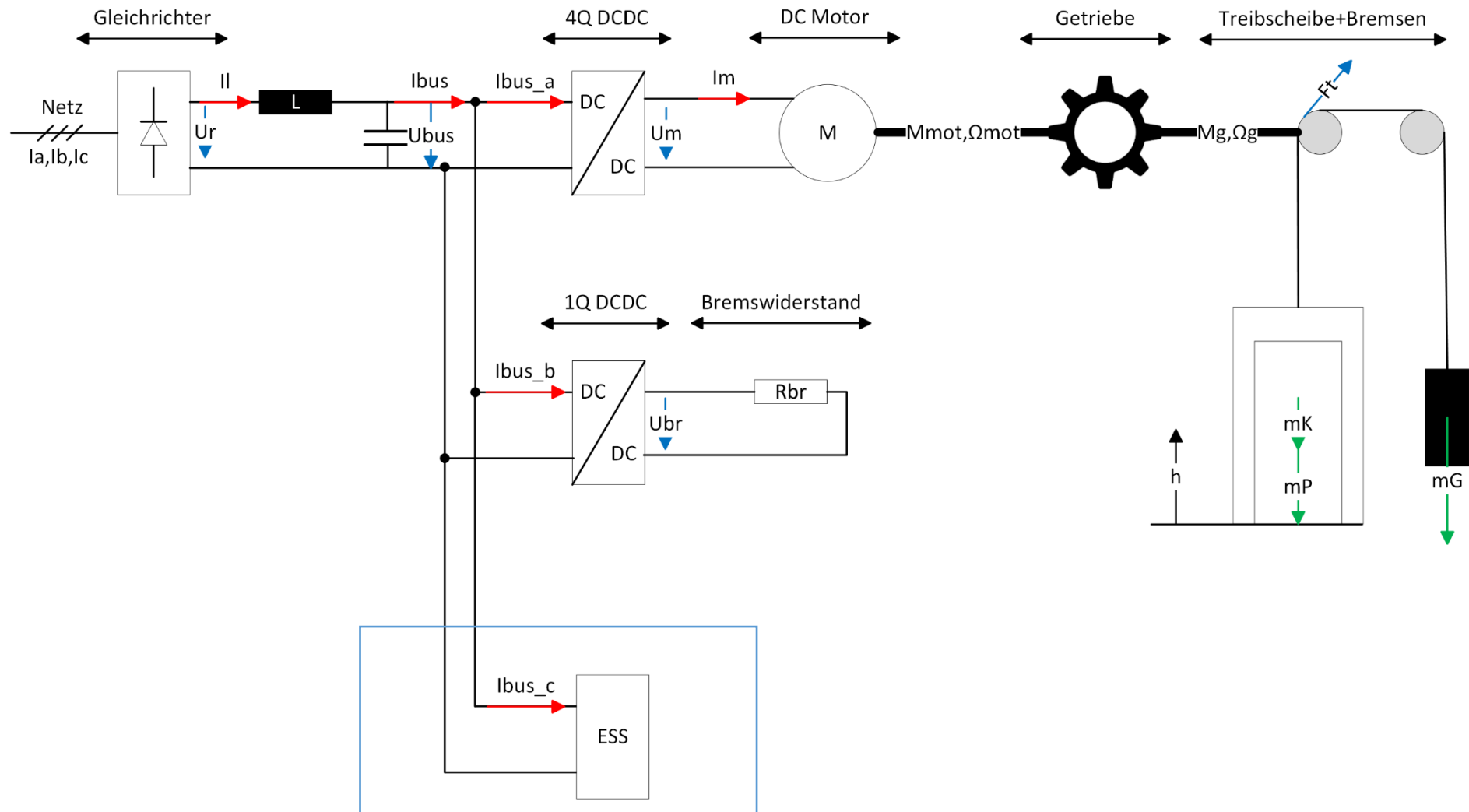
Zu Beginn wurde das Projekt in drei Abschnitte aufgeteilt. In der ersten Planungsphase wurde mit der Software Matlab - Simulink das System modelliert. Damit ein Aufzug virtuell erstellt werden kann, muss das Prinzip verstanden werden. Hierfür wurde eine Analyse des elektromechanischen Systems gemacht. Anhand der REM (Makroskopischen Darstellung der Energie) wurde das System in verschiedene Blöcke aufgeteilt. Die Steuerung erfolgte durch die Umkehrung des Systems. Für den Betrieb des Aufzugs wurde eine Energie Management Strategie (EMS) entwickelt.[8]

Mit dem Programm Simulink kann eine Strategie auf einfache und schnelle Art getestet werden, weshalb man nicht direkt mit dem Echtzeitsimulator gearbeitet hat.

In der zweiten Phase wurde anhand von Messungen ein Grössenkriterium für das Speichersystem entwickelt. Zudem wurde eine Speichertechnologie ausgewählt und eine Stromschnittstelle definiert. Es erfolgte eine Leistungsanalyse aus realen Fallstudien.

Das Modell wurde im Echtzeitsimulator Thyphoon HIL übertragen. Zusätzlich wurde ein Control Panel mit der Umgebung eines realen Aufzugs erstellt. Der Nutzer kann den Aufzug in Echtzeit betreiben. Mit verschiedenen Kontrollen wurde der Nachweis für die Funktion des Systems erbracht.

## 2 Analyse und Modellierung eines elektromechanischen Umwandlungssystems





Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
mP	Gewicht der Personen	[kg]
mG	Gegengewicht	[kg]
mK	Gewicht der Kabine	[kg]
Ft	Kraft des Aufzugs	[N]
v	Geschwindigkeit des Aufzugs	[m/s]

In einem Aufzug werden Personen von einem Stockwerk in ein anderes Stockwerk transportiert. Es gibt verschiedene Technologien von Aufzügen. Jedoch werden in dieser Arbeit ausschliesslich elektromechanische Aufzüge untersucht. Bei diesen Aufzügen wird die elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt, damit die Kabine horizontal bewegt werden kann.

Der Motor ist über ein Getriebe mit der Treibscheibe verbunden. Die Kabine ist auf einer Seite mit dem Kabel befestigt. Auf der anderen Seite ist ein Gegengewicht, damit beim Verschieben ein kleineres Drehmoment und damit weniger Energie aufgewendet werden muss.

Die Seilmassen können vernachlässigt werden. Mit einer maximalen Höhe von 18 Meter hat das Gewicht des Seils keinen grossen Einfluss.

Die Gleichung des Aufzugs wird mit dem zweiten Newtonschen Gesetz aufgestellt:

$$\sum \vec{F}_i = \sum m_i \cdot \vec{a}$$

$$Ft - (mP + mK - mG) \cdot g = (mP + mK + mG) \cdot \frac{dv}{dt}$$

### 2.1.1 Dioden Gleichrichter

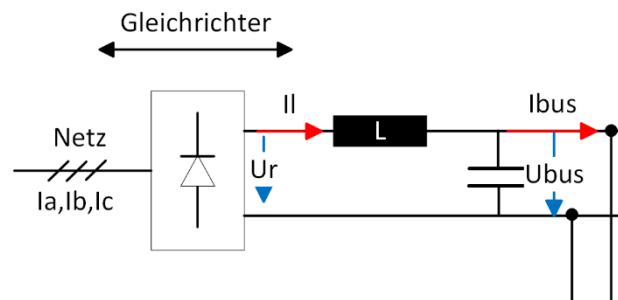


Abbildung 1: Ersatzschaltbild des Gleichrichters

Für die Energieversorgung wird das dreiphasige Wechselstromnetz verwendet. Mit dem Gleichrichter wird eine Gleichspannung erzeugt, welche nicht gesteuert werden kann. Wenn sich die Spannung am Netz verändert, wird auch die Spannung ( $U_r$ ) verändert.

$$U_r = \frac{3}{\pi} * \sqrt{3} * \sqrt{2} * 230V = 538[V] \quad [7]$$

### 2.1.2 Spule

In der Matlab Simulation wird für die Spule eine Sättigung eingefügt, damit kein negativer Strom entsteht.

Die Induktivität und der Widerstand der Leitung werden in einem Block dargestellt:

$$U_r - U_{bus} = L * \frac{dI_L}{dt} + R * I_L$$

$$I_L = \int \frac{U_r - U_{bus} - R * I_L}{L} * dt$$

### 2.1.3 Glättungskondensator

Der Kondensator glättet die Spannung auf dem Bus:

$$C * \frac{dU_{bus}}{dt} = I_L - I_{bus}$$

$$U_c = \int \frac{I_L - I_{bus}}{C} * dt$$

Er kann ausserdem die Energie zwischenspeichern:

$$E = \frac{1}{2} * C * U_{bus}^2 = \frac{1}{2} * 0.01[F] * 538[V]^2 = 1447[Ws]$$

### 2.1.4 Motor und Getriebe

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
$J_{mot}$	Trägheit des Motors	$[kg \cdot m^2]$
$J_s$	Trägheit der Treibscheibe	$[kg \cdot m^2]$
$M_{mot}$	Drehmoment des Motors	$[Nm]$
$M_g$	Drehmoment der Last	$[Nm]$
$\Omega_{mot}$	Drehgeschwindigkeit des Motors	$[rad/s]$
$\Omega_g$	Drehgeschwindigkeit der Treibscheibe	$[rad/s]$
$i$	Übertragungsverhältnis	$[-]$

Der Motor wird zur Vereinfachung als Gleichstrommotor dargestellt. In dieser Arbeit ist es nicht wichtig, welcher Motor ausgewählt wird. Wichtig ist das Verhalten des Aufzugsystems. In der Praxis werden Permanentmagnet-erregte, frequenzgeregelte Synchronmotoren oder frequenzgeregelte Asynchronmotoren verwendet. Wenn der Motor kein Getriebe hat, sind die Ströme grösser, wodurch im Motor zusätzliche Verluste entstehen. [10]

$$P_v = I_m^2 * R_m$$

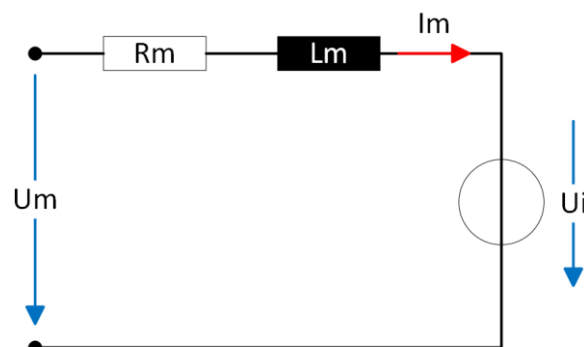


Abbildung 2: Ersatzschaltbild eines Gleichstrommotor

$$U_m - U_i = R_m * I_m + L_m * \frac{dI_m}{dt}$$

$$I_m = \frac{1}{L_m} * \int (U_m - U_i - R_m * I_m) * dt$$

Mit der Drehmomentkonstante kann anhand des Stroms das erzeugte Drehmoment ausgerechnet werden. Die Formel kann nur angewendet werden, wenn der Motor Energie verbraucht. Soll Energie erzeugt werden, muss der Wirkungsgrad als Kehrwert genommen werden.

$$M_{mot} = I_m * K_m * \eta_{mot}$$

$$U_i = \Omega_{mot} * K_m$$

Das Getriebe wird nicht in jedem Aufzug verwendet. Manche Aufzüge werden mit einem getriebelosen Aufzugsantrieb betrieben. Das Getriebe hat den Vorteil, dass der Motor mit einer höheren Drehzahl arbeitet. Jedoch hat ein Getriebe Reibungsverluste, wodurch der Wirkungsgrad verschlechtert wird. In diesem Fall gilt dasselbe Prinzip wie bereits oben erwähnt wurde. Der Wirkungsgrad muss bei negativer Leistung als Kehrwert genommen werden.

$$\begin{cases} Mg = i * M_{mot} * \eta_g \\ \Omega_{mot} = \Omega_g * i \end{cases}$$

Das Trägheitsmoment des Motors, der Treibscheibe und Umlenkrolle wird in der Simulation nicht berücksichtigt. Der Grund erfolgt nach den Berechnungen:

$$M_{mot} - \frac{Mg}{i} = \left( J_{mot} + \frac{Js}{i^2} \right) * \frac{d \Omega_{mot}}{dt}$$

$$i * M_{mot} - Mg = (J_{mot} * i^2 + Js) * \frac{d \Omega_g}{dt}$$

$$Mg = i * M_{mot} - (J_{mot} * i^2 + Js) * \frac{d \Omega_g}{dt}$$

Da die Geschwindigkeitsänderung in der Zeit klein ist, kann das gesamte Trägheitsmoment vernachlässigt werden. Die Normgeschwindigkeit des Aufzugs beträgt 1 [m/s]. [3]

### 2.1.5 Treibscheibe, Umlenkrolle und mechanische Bremse

Die Antriebswelle ist mechanisch mit der Treibscheibe verbunden, damit das Seil des Aufzugs bewegt werden kann. Wenn der Aufzug nicht in Betrieb ist, wird die Scheibe mit einer mechanischen Bremse blockiert, damit keine elektrische Energie mehr verbraucht wird. Die Bremse wird vor dem Start gelöst, damit der Aufzug keine zusätzlichen Reibungsverluste mit sich bringt.

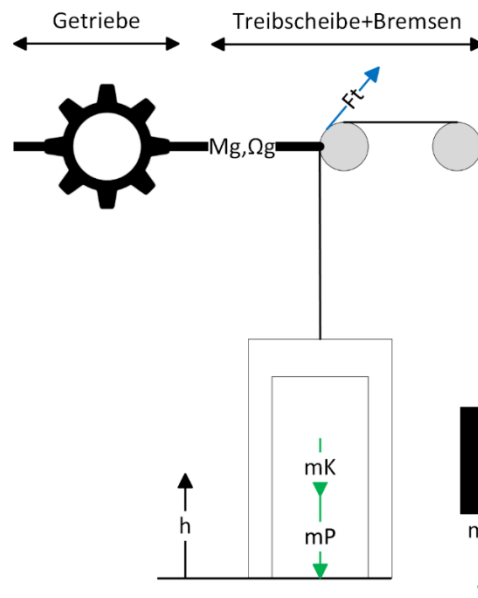


Abbildung 3: Ersatzschaltbild der Treibscheibe

Diese Formel gilt nur für eine negative Leistung

$$\begin{cases} Mg = r * Ft * \eta r \\ v = r * \Omega g \end{cases}$$

### 2.1.6 Bremswiderstand

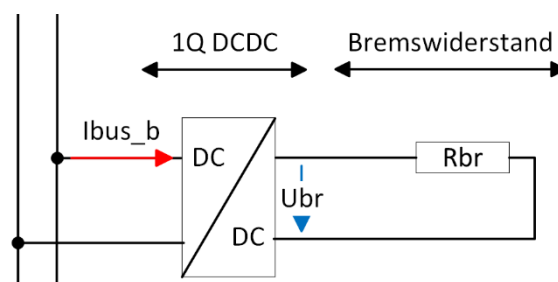


Abbildung 4: Ersatzschaltbild des Bremswiderstands

Wenn der Motor als Generator wirkt, muss die Energie verbraucht werden. Hierfür wird zurzeit ein Bremswiderstand benutzt. Sobald die Gleichspannung auf dem Bus zu gross wird fängt der Widerstand an, diese Energie in Wärme umzuwandeln. Das Ziel dieses Projektes ist es, diese Energie zu speichern. Jedoch darf der Widerstand auf keinen Fall weggelassen werden, da im Fehlerfall ansonsten verschiedene Komponenten beschädigt werden. Zusätzlich ist nicht klar, ob die gesamte Energie gespeichert werden kann.

## 2.2 Regelung

### 2.2.1 Aufzug

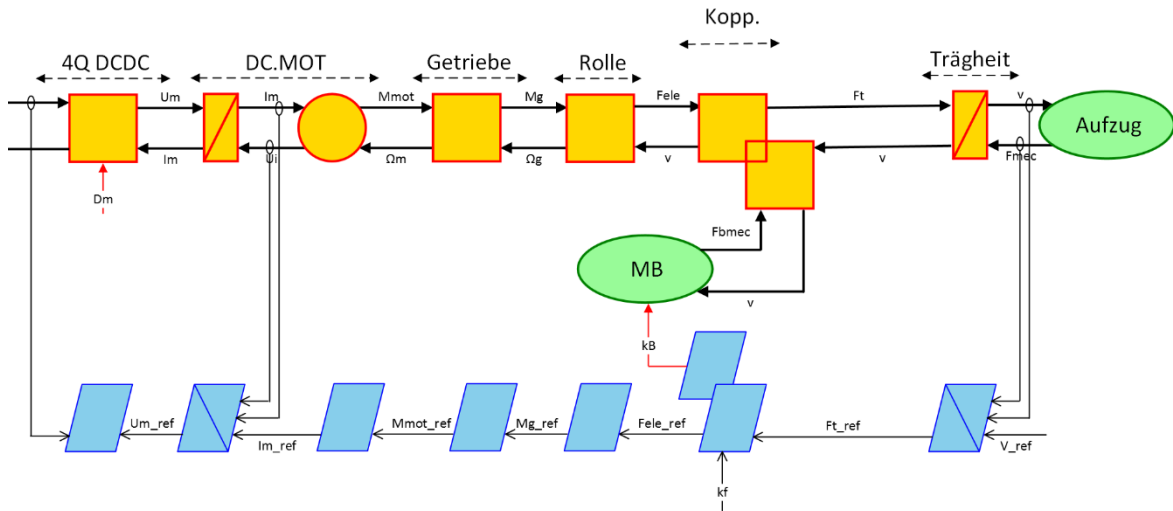


Abbildung 5: Blockschaltbild des Aufzugs

Der Motor wird mit einem Vierquadrantensteller geregelt. Mit dem Vierquadrantensteller ist die Spannung und der Strom umkehrbar. Zunächst wird das Tastverhältnis für beide Halbbrücken definiert:

$$D1 = \frac{T1_{on}}{T} \quad 0 < D1 < 1$$

$$D2 = \frac{T2_{on}}{T} \quad 0 < D1 < 1$$

Je nachdem wie die Tastverhältnisse geregelt werden, ist die Spannung negativ oder positiv:

$$\begin{cases} D1 = D \\ D2 = 1 - D1 \end{cases}$$

Aus der Definition folgt:

$$Um = U_{bus} * (2 * D - 1)$$

$$I_{c\_a} = Im * (2 * D - 1)$$

$$Dm = \left( \frac{Um\_ref}{U_{bus\_mes}} + 1 \right) * \frac{1}{2}$$

Die Referenzspannung  $Um$  wird mit einem PI-Regler geregelt:

$$Um\_ref = Kp * (Im\_ref - Im\_mes) + Ki * \int (Im\_ref - Im\_mes) * dt + Ui\_mes$$

Der Referenzstrom wird mit der Referenzkraft ausgerechnet:

$$Im\_ref = \frac{Ft\_ref * r}{i * Km}$$

Die Referenzkraft wird ebenfalls mit einem PI-Regler gesteuert:

$$F_{t\_ref} = K_p * (v_{ref} - v_{mes}) + K_i * \int (v_{ref} - v_{mes}) * dt + F_{mec\_mes}$$

Der Eingangsparameter ist die Geschwindigkeit ( $v_{ref}$ ).

### 2.2.2 Bremswiderstand

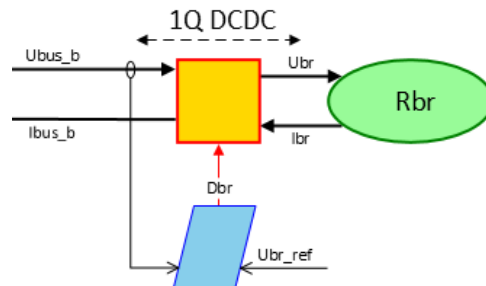


Abbildung 6: Blockdiagramm des Bremswiderstands

Der Bremswiderstand wird mit einem Abwärtssteller (Buck) geregelt. Das Tastverhältnis ist:

$$D_{br} = \frac{T_{on}}{T}$$

Anhand des Tastverhältnisses kann die Spannung und der Strom am Ausgang des Wandlers berechnet werden:

$$U_r = D_{br} * I_{br}$$

$$I_{br} = \frac{I_{c\_b}}{D_{br}}$$

## 2.3 Geschwindigkeitsprofil eines Aufzugs

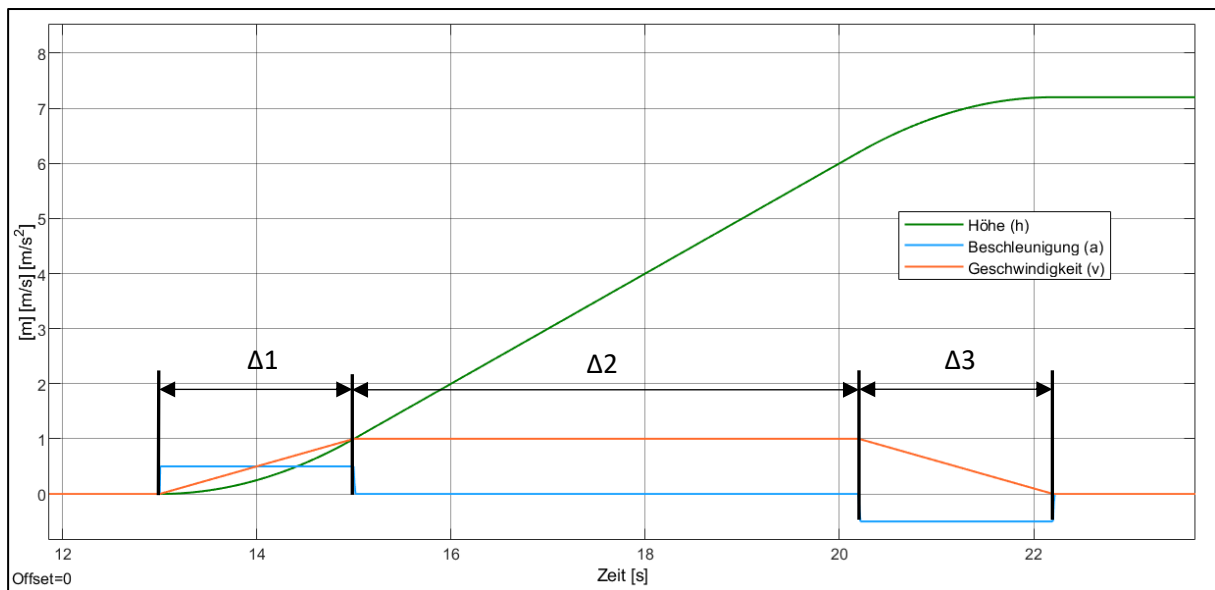


Abbildung 7: ideales Fahrprofil

Der Aufzug wird mit einer Geschwindigkeitsregelung gesteuert. Am Anfang wird beschleunigt und am Ende wird abgebremst. Dazwischen fährt der Aufzug mit einer konstanten Geschwindigkeit. Aus der Geschwindigkeit erfolgt das Beschleunigungs- und Streckenprofil:

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt}$$

$$\vec{s}(t) = \int \vec{v}(t) * dt$$

Die Streckenabschnitte werden in drei Teile aufgeteilt. Im ersten Streckabschnitt wird beschleunigt. Im zweiten Streckabschnitt fährt man mit einer konstanten Geschwindigkeit und im dritten Streckabschnitt wird abgebremst. Der erste und dritte Streckabschnitt braucht dieselbe Zeit und es wird dieselbe Strecke zurückgelegt.

$$\Delta t1 = \frac{v_{max}}{a}$$

$$\Delta t3 = \Delta t1$$

$$\Delta s1 = \frac{1}{2} * a_{max} * \Delta t1^2$$

$$\Delta s3 = \Delta s1$$

Aus den erhaltenen Werten können die Geschwindigkeit und die Strecke im zweiten Streckenabschnitt berechnet werden:

$$\Delta s2 = h_{max} - \Delta s3 - \Delta s1$$

$$\Delta t2 = \frac{\Delta s2}{v_{max}}$$



### 2.3.1 Geschwindigkeitsprofil mit Matlab-Simulink

In Matlab-Simulink wird das Fahrprofil mit einer lookup Tabelle erstellt. Mit dieser Tabelle können aufwendige Berechnungen vermieden und die Laufzeit des Programms verschnellert werden. Die Ausführungsmethode wird auf linear eingestellt. Ein Beispiel hierfür erfolgt nun:

Es wird eine Tabelle für die Geschwindigkeit und die Zeit erstellt:

*Geschwindigkeit* [0 1 1 0]

*Zeit* [0 1 2 3]

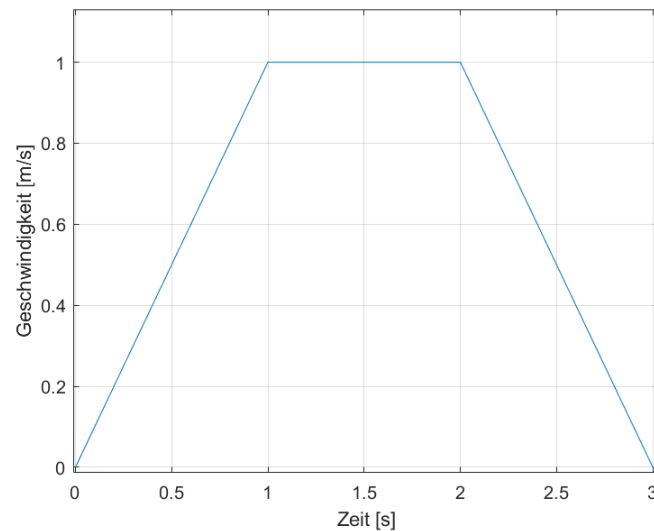


Abbildung 8: Geschwindigkeitsprofil mit einer lookup Tabelle

## 2.4 Wirkungsgrad

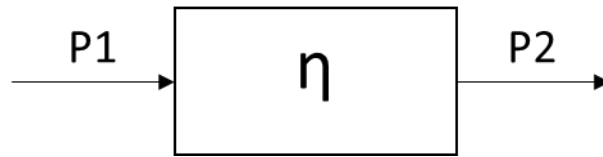


Abbildung 9: Ersatzschaltbild des Wirkungsgrades

Der Wirkungsgrad ist folgendermassen definiert:

$$P2 = P1 * \eta$$

Wenn der Aufzug nicht Verbraucher, sondern Erzeuger ist, muss die Formel angepasst werden.

Die Eingangsleistung wird zur Ausgangsleistung:

$$P2 = \frac{P1}{\eta}$$

Damit das System in der Nähe des Nulldurchgangs nicht abwechselnd den Wert ändert, wird ein Hysterese Block hinzugefügt.

Zu Beginn wird die Energie des Gleichrichters, des Bremswiderstandes und des Aufzugs mit verschiedenen Wirkungsgraden vom System aufgezeichnet. Mit diesem Vorgehen können die maximale Leistung und Energie herausgefunden werden, welche gespeichert werden könnte.

$$E(\text{Gleichrichter}) = \int P(\text{Gleichrichter}) * dt = \int U_r * I_l * dt$$

$$E(\text{Bremswiderstand}) = \int U_{br} * I_{br} * dt$$

$$E(\text{Aufzug}) = \int F_t * v * dt$$

Für die weiteren Messungen wurden die unten aufgelisteten Wirkungsgrade angenommen, wie sie gemäss heutiger Kenntnis existieren:

Abkürzung	Bezeichnung	Wert + Einheit
$\eta_W$	Wirkungsgrad des DC/DC Wandlers	95 [%]
$\eta_{mot}$	Wirkungsgrad des Motors	80 [%]
$\eta_g$	Wirkungsgrad des Getriebes	80 [%]
$\eta_r$	Wirkungsgrad der Seilrolle	90 [%]

## 2.5 Modell Simulink

Das Modell von Simulink ohne Energiespeicher sieht wie folgt aus:

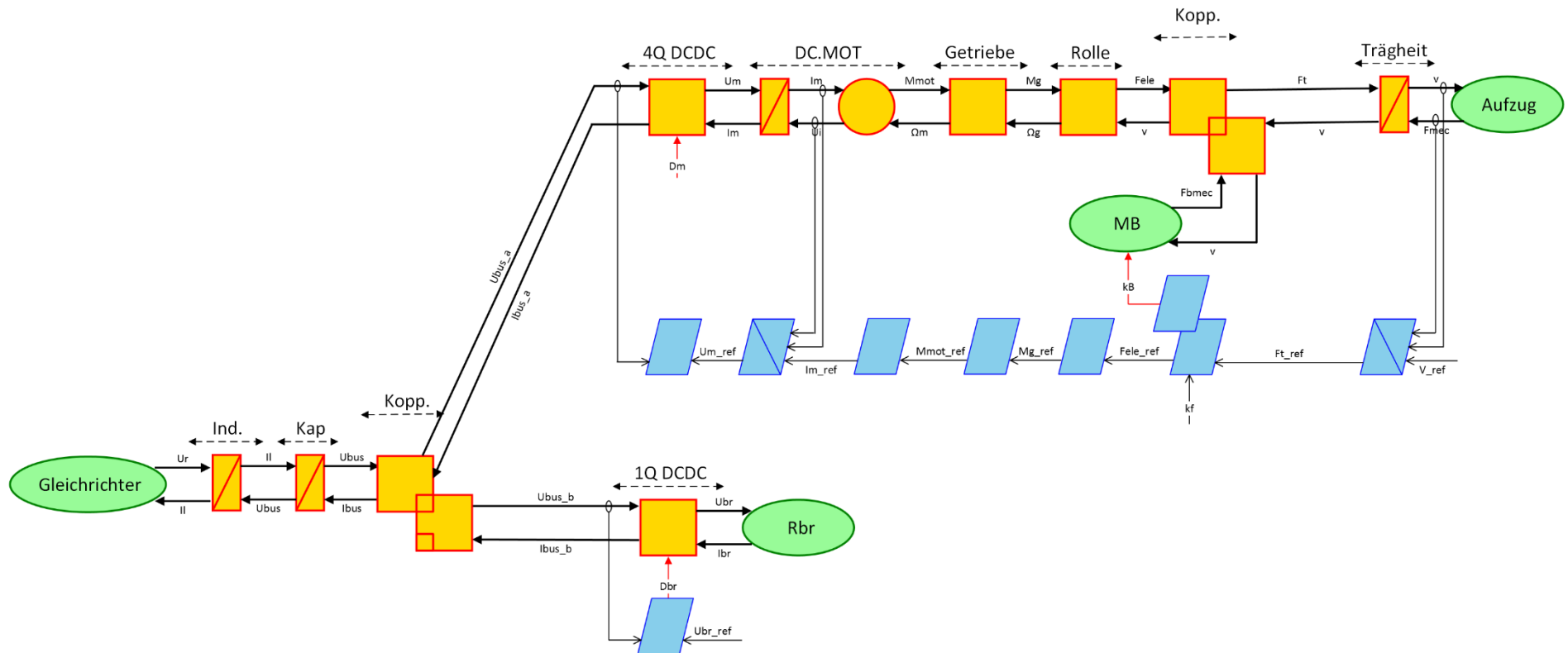


Abbildung 10: Modell Simulink

### 3 80 Fahrzyklen mit Simulink

Mit Matlab wurde ein Profil für die Steuerung des Aufzugs erstellt. Es wurden 80 verschiedene Zyklen ausgeführt. Die Tests wurden mit dem Zufallsgenerator von Matlab erstellt. In der nachfolgenden Grafik sind die Fahrzyklen des Aufzugs dargestellt.

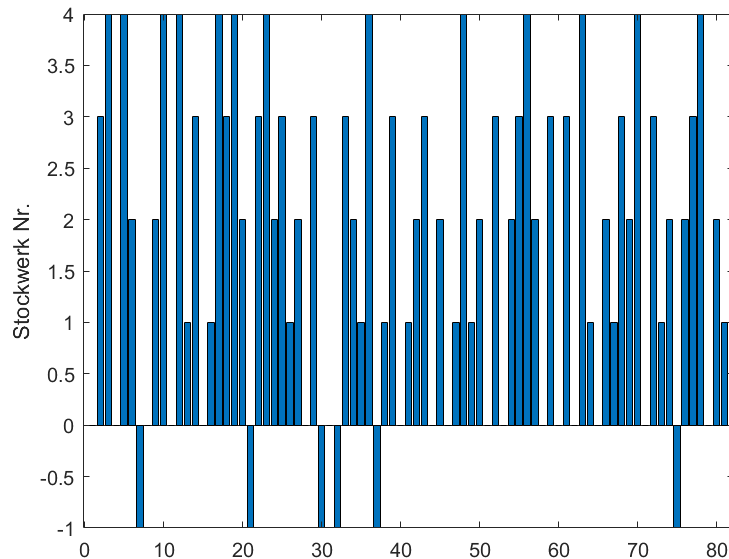


Abbildung 11: Matlab plot mit 80 Fahrten

Zusätzlich wurde ein Gewichtsprofil ebenfalls mit dem Generator von Matlab erstellt. Das Diagramm wird hier nicht dargestellt.

Die maximale Leistung während 80 Fahrzyklen wurde mit den verschiedenen Wirkungsgraden aufgezeichnet und grafisch ausgewertet. Die Anzahl Fahrten ist für jede Darstellung dieselbe. Zu Beginn wurde ein globaler Wirkungsgrad im System hinzugefügt, damit die Leistungen und die dazugehörigen Energien aufgenommen werden können. Der Wirkungsgrad ist zwischen dem Gleichrichter und der Treibscheibe.

Die Messungen wurden mit folgenden Angaben durchgeführt:

Abkürzung	Bezeichnung	Wert
h	Maximale Höhe	18 [m]
nS	Anz. Stockwerke	5
vmax	Maximale Geschwindigkeit	1 [m/s]
amax	Maximale Beschleunigung	0.5[m/s <sup>2</sup> ]
mP	Maximale Masse der Personen	600 [Kg]
mG	Masse des Gegengewichts	1000 [Kg]
mK	Masse der Kabine	800 [Kg]
d	Durchmesser Treibscheibe	0.2 [m]
i	Übersetzungsverhältnis Getriebe	12

### 3.1.1 Leistung in Abhängigkeit des Wirkungsgrades

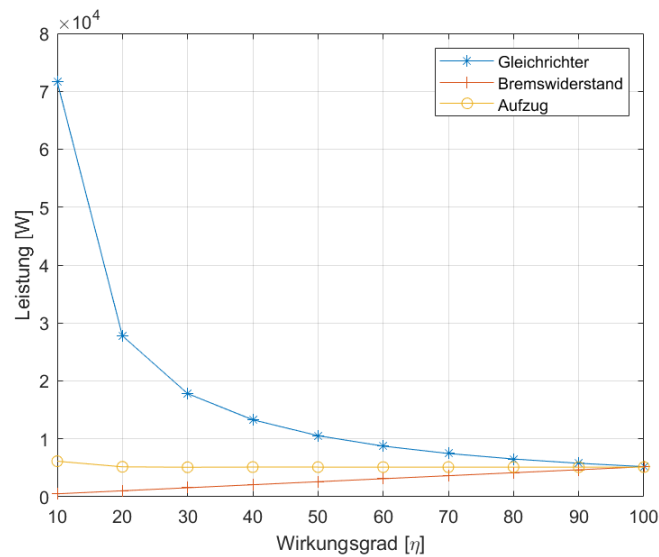


Abbildung 12: Spitzenleistungen anhand des Wirkungsgrades

Die mechanische Spitzenleistung für den Aufzug bleibt konstant. Die Spitzenleistung im Gleichrichter nimmt mit einem schlechteren Wirkungsgrad stark zu. Ein Energie Speicher System (ESS) wäre in diesem Fall sehr hilfreich, damit das Netz entlastet werden kann. Jedoch sollt der Wirkungsgrad nicht tiefer als 30-40 Prozent sein, weil die Leistungsspitzen sehr gross werden.

### 3.1.2 Energie in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad

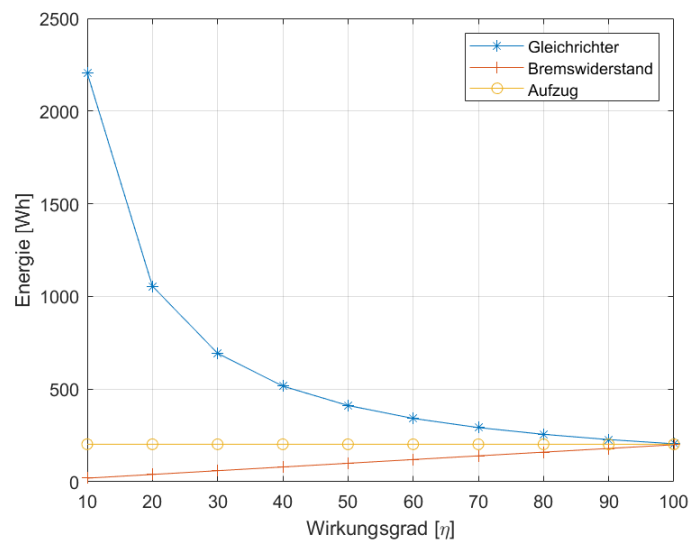


Abbildung 13: Energiebilanz mit verschiedenen Wirkungsgraden

Gemäss der Abbildung 12 verbraucht ein Aufzug wegen seinem Gegengewicht sehr wenig Energie. Bei einem Wirkungsgrad von 40% wurden nur 500Wh für die 80 Fahrzyklen verbraucht.

### 3.1.3 Netzurückspeisung

Mit der Netzurückspeisung wird die erzeugte Energie ins Netz zurückgespeist. Hierfür muss der Gleichrichter durch einen DC/AC Wandler ersetzt werden. In dieser Arbeit wird die Netzurückspeisung jedoch nicht in Betracht gezogen. Zudem können die Leistungsspitzen mit der Rückspeisung nicht vermindert werden.

## 4 Auswertung bereits durchgeführter Messungen

In einem Mehrfamilienhaus in Sitten wurden während fünf Tagen von der HESSO Messungen der Fahrzyklen, der Geschwindigkeit, des Gewichtes und der Leistung des Motors an einem Aufzug vorgenommen. Die gemessenen Daten wurden danach mit Matlab ausgewertet.

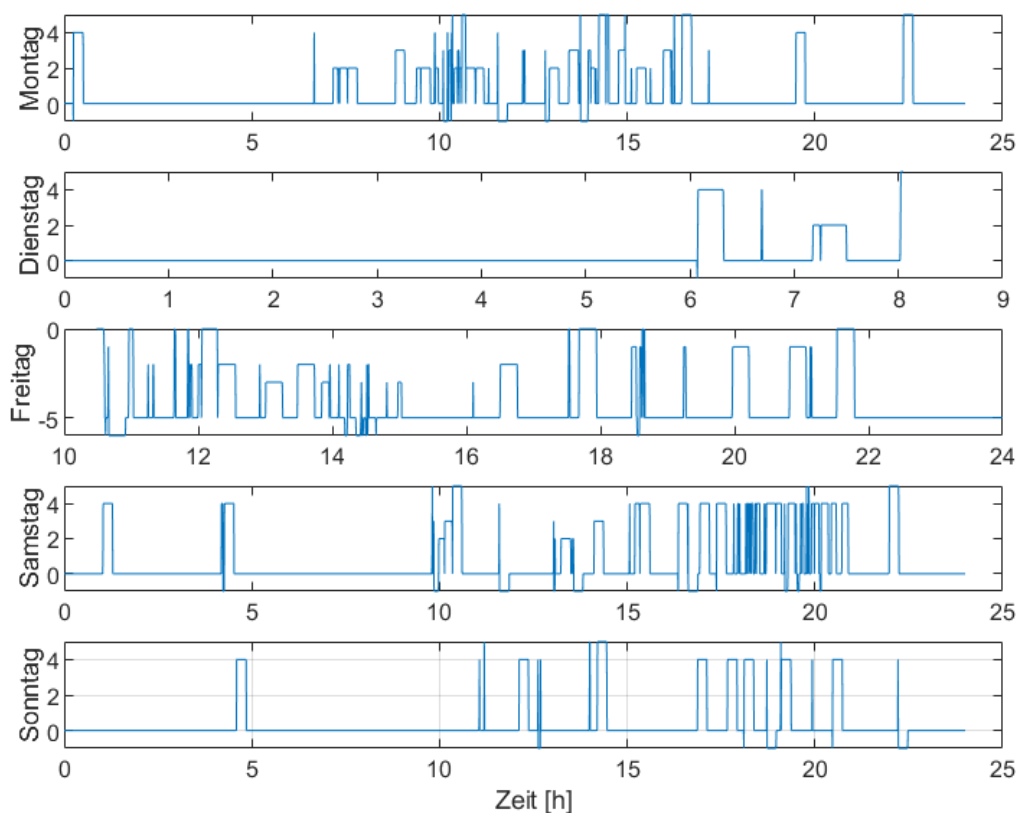


Abbildung 14: Fahrzyklen einer Woche in einem Mehrfamilienhaus

In dieser Grafik ist zu beachten, dass am Dienstag und Freitag nicht der ganze Tag aufgezeichnet wurde.

Für diesen Aufzug könnte man wahrscheinlich eine gewisse wöchentliche Tendenz erkennen. Jedoch wird das Fahrzyklenprofil für einen anderen Aufzug wieder komplett anderes aussehen. Dies stellt ein Problem für die Energiemanagementstrategie dar. Diese muss nämlich so entworfen werden, dass sie bei allen Aufzügen angewendet werden kann.

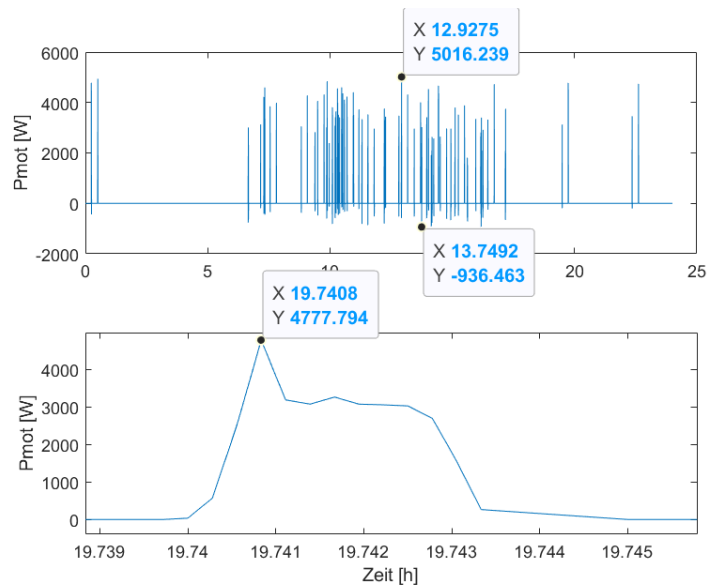


Abbildung 15: Leistung des Motors am Montag

Die maximale Leistungsspitze des Motors beträgt 5kW. Die erzeugte Spitzenleistung ist mit 936W um einiges kleiner. Über die gesamte Zeit wird klar, dass bei diesem Aufzug nicht sehr viel Energie gespeichert werden kann. Trotzdem können die Spitzenleistungen auf dem Netz reduziert werden.

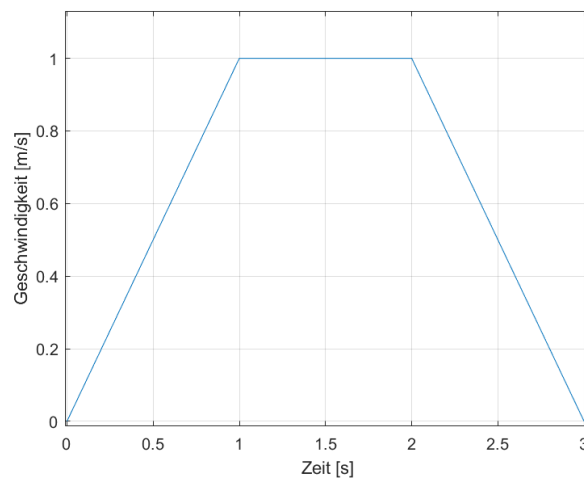


Abbildung 16: ideales Geschwindigkeitsprofil

Vergleicht man das ideale Geschwindigkeitsprofil oben mit einem realistischen Profil (siehe unten), wird bewusst, dass die Realität stark vom idealen Profil abweicht.

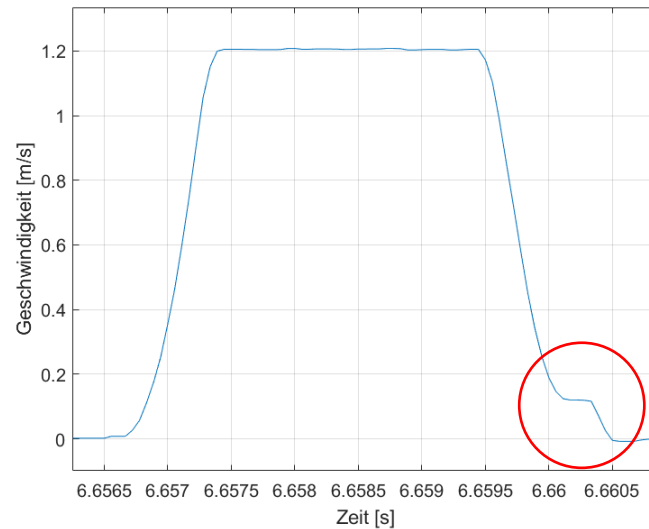


Abbildung 17: Gemessenes Geschwindigkeitsprofil

Wenn der Aufzug nur eine Geschwindigkeitsregelung hätte, würde er nie die genaue Position erreichen. Deshalb hat man zusätzlich eine Positionsregelung. Der Aufzug wird am Ende auf eine Geschwindigkeit von 0.12 [m/s] abgebremst und fährt solange weiter bis er die Position erreicht. Danach bremst er abrupt ab. In den Simulationen wird die Positionsregelung nicht berücksichtigt.

Das Gewicht in der Kabine, welches hier nicht in einem Diagramm dargestellt wird, wurde ebenfalls gemessen.



## 5 ESS (Energie Speicher System)

### 5.1 Technologie

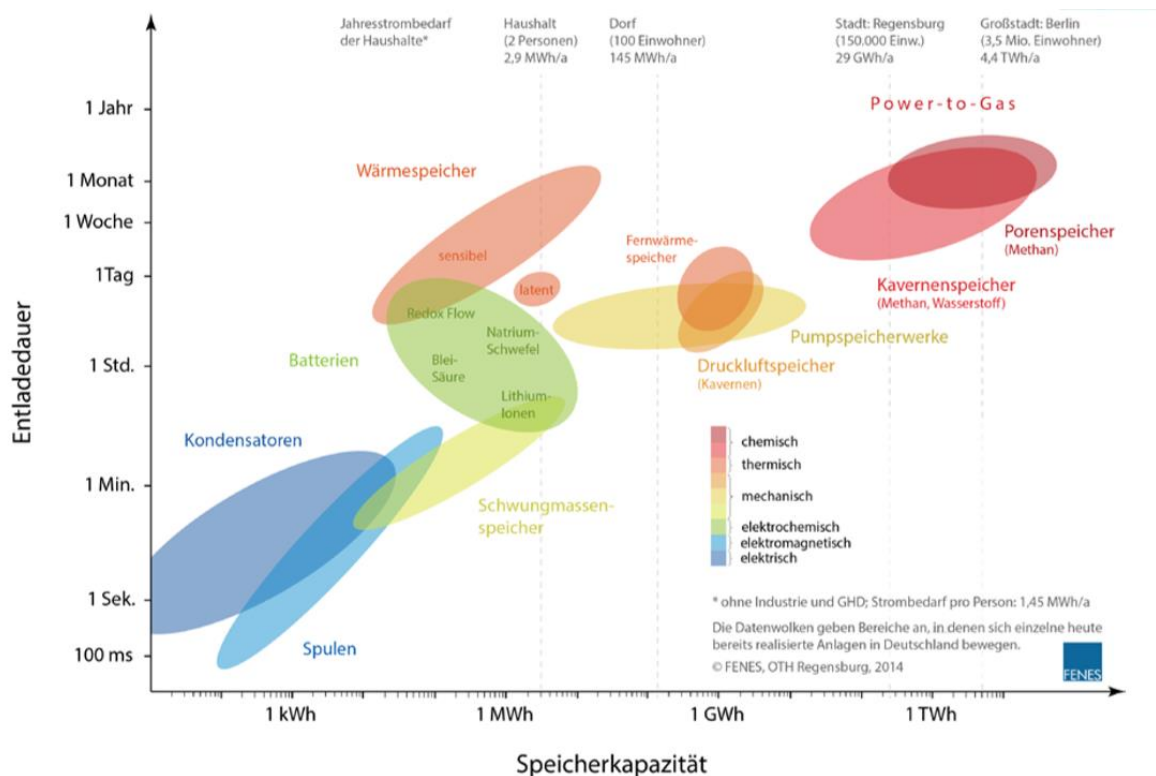


Abbildung 18: Quelle (Michael Sterner, Ingo Stadler. *Energiespeicher, Technologie, Integration*. Regensburg, Köln 2017.2. Korrigierte und ergänzte Auflage, Seite 654)

Die Speicherung mit Kondensatoren und Spulen ist sehr effizient, jedoch ist die Speicherkapazität begrenzt. Dieses Problem kann mit elektrochemischen Energiespeichern (Batterien und Akkumulatoren) gelöst werden. Allerdings ist der Wirkungsgrad dieser Energiespeicher schlechter. Wenn eine verlustarme Langzeitspeicherung angestrebt wird, gebraucht man chemische Energiespeichersysteme. Das Einspeichern der Energie ist mit hohen Verlusten verbunden. Das Prinzip der mechanischen Energiespeicherung basiert auf den Gesetzen von Newton. Die Speicherformen sind in kinetischer und potenzieller Form oder als Druckenergie vorhanden. Unter dem Begriff der Thermischen Energiespeicher werden Wärme und Kältespeicher zugeordnet. Ein Wärmespeicher kann Energie aufnehmen und ein Kältespeicher gibt Energie in der Form von Wärme ab.[5]

Für dieses Projekt eignen sich nur elektrochemische und elektrische Energiespeicher. Die konkrete Auswahl des Energiespeichers wird später anhand der Speicherkapazität und der Energiedichte getroffen.

Damit möglichst viel Energie gespeichert werden kann, sollte das System einen guten Wirkungsgrad aufweisen. Bei einem idealen Aufzugsantrieb ist das Verhältnis von der benötigten zur zurückgespeicherten Energie 1:1. Die Energie wird nur zwischen der Applikation und dem Energie Speicher System ausgetauscht. Da kein idealer Aufzugsantrieb existiert, muss die Verlustleistung mit dem Netz kompensiert werden.

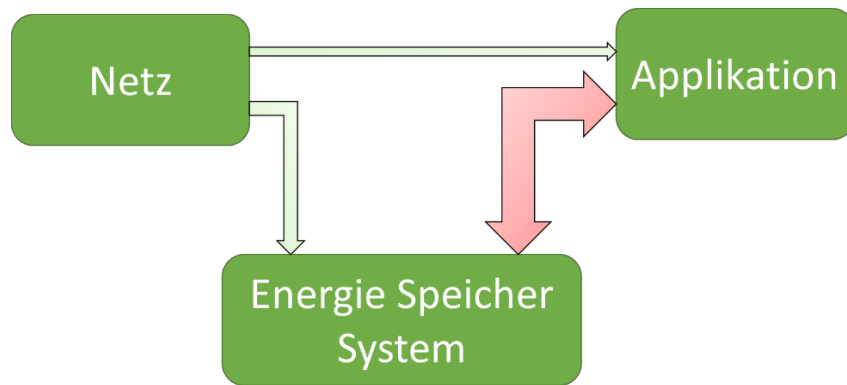


Abbildung 19: Energieflüsse zwischen den verschiedenen Akteuren

### 5.1.1 Elektrochemische Speicher

In der Tabelle werden die Vorteile und Nachteile der verschiedenen Speicherarten aufgelistet. Die Tabelle ist aus dem Buch «Energiespeicher-Bedarf-Technologie-Integration» von Michael Sterner und Ingo Stadler.

	Stärken und Möglichkeiten	Schwächen und Hindernisse
<b>Kondensatoren</b>	Sehr hoher Wirkungsgrad	Geringe Energiedichte
	Hohe Leistungsfähigkeit	Hohe Kosten pro installierte Energie
	Lange Zyklenlebensdauer	Hochleistungsanwendungen können von »Leistungsbatterien« übernommen werden
	Einsatz für Anwendungen mit höchsten Anforderungen an Reaktionszeiten (z. B. Spannungsqualität)	
<b>Spulen(SMES)</b>	Hohe Leistungsfähigkeit	Enorm hoher Kühlaufwand
	Hohe Zyklenlebensdauer	Teure Rohstoffe für Supraleiter
	Neue supraleitende Materialien	Hoher Aufwand (Messelektronik, Kühlung)
	Anwendung für dezentrale Kurzschlussstrombereitstellung	Sicherheitsanforderungen (niedrige Temperaturen, starke magnetische Felder)
		Unzureichend erprobt
<b>Blei-Säure-Batterie</b>	Am meisten etablierte Batterietechnologie	Lade- und Entladefähigkeit nicht symmetrisch
	Kostengünstigstes Batteriesystem mit kurzen Amortisationszeiten	Schädliche Tiefentladungen
	Akzeptable Energie- und Leistungsdichte für stationäre Anwendungen	Lange Standzeiten mit tiefen Ladezuständen
	Hohe Sicherheit im Vergleich zu Lithium- oder Natrium-Batterien	Gutes Temperaturmanagement erforderlich

	Kein komplexes Zellmanagement erforderlich	Batterieraumlüftung erforderlich
	Weltweit lange Erfahrungen vorhanden	Begrenzte Zyklenlebensdauer
	Seit 150 Jahren im Einsatz	Konkurrenz durch Kostensenkung bei Lithium-Batterien
	Durch vollautomatisierte Massenproduktion Kostensenkung möglich	Begrenzte Bleilagerstätten
	Unabhängig von Standortbedingungen	
	Viele Hersteller weltweit	
	Günstigster Speicher für Inselnetze	
<b>Nickel-Batterien</b>	Sehr hohe zyklische und kalendarische Lebensdauer (geringes Dentrigenwachstum)	Hohe Kosten für Nickel
	Hohe Energiedichte	Konkurrenz durch Kostensenkung bei Lithium-Batterien
	Einsatz im Hochleistungsbereich	
	Anwendung im Consumer-Bereich und bei Hybridfahrzeugen	
	Einsatz bei tiefen Temperaturen und extremen Umgebungsbedingungen möglich	
	Tolerant gegenüber Tiefentladung und unterschiedlichen Ladezuständen	
<b>Lithium-Batterien</b>	Höchste Energiedichte	Keine inhärente Sicherheit (thermisches Durchgehen)
	Höchste Wirkungsgrade	Aufwendiges Batteriemanagementsystem für Sicherheit und lange Lebensdauern erforderlich
	Hohe Leistungsfähigkeit	Einzelzellüberwachung

	Große Stückzahlen führen zu Kostensenkung	Herstellung (Packaging) und Kühlung aufwendig
	Keine speziellen Anforderungen an Standorte	Schnellladefähigkeit
	Anwendung im stationären und mobilen Bereich (Batterieparks und Elektromobilität)	Lebensdauer begrenzt bei Ladezuständen außerhalb 30–70 %
	Größter Hoffnungsträger unter den Batterien in punkto Kostensenkung und Anwendungen	Hohe Kosten
	Entwicklung neuer Aktivmaterialien	Soziale Akzeptanzprobleme aufgrund Lithiumabbau
		Begrenzte Lithiumvorkommen

Abbildung 20: Quelle (Michael Sterner, Ingo Stadler. *Energiespeicher, Technologie, Integration*. Regensburg, Köln 2017.2. Korrigierte und ergänzte Auflage, Seite 665)

Die Lithium Batterien haben eine hohe Leistungsfähigkeit und einen guten Wirkungsgrad. Die Leistungsschwankungen der Batterien darf aber nicht zu gross sein, denn ansonsten nimmt die Lebensdauer stark ab. Im Vergleich zwischen den Superkondensatoren und den Batterien kostet der Superkondensator mit einigen wenigen Wh dasselbe wie ein Lithium-Ionen-Akku mit mehreren Wh. [5]

### 5.1.2 Superkondensator

Die Energiespeicherung eines Superkondensators erfolgt durch ein elektrisches Feld.

Superkondensatoren sind die Weiterentwicklung der Kondensatoren. Die Energiedichte ist gegenüber Akkumulatoren kleiner jedoch ist die Leistungsdichte grösser, wodurch schneller aufgeladen und wieder entladen werden kann. Während des Ladens erfolgt ein Stromfluss auf den Kondensator.

$$dW = u * i * dt$$

Die Spannung des Kondensators verändert sich beim Aufladen und Entladen:

$$I_{ess} = C * \frac{U_{ess}}{dt}$$

$$U_{ess} = \frac{1}{C} * \int I_{ess} * dt$$

### 5.1.3 Batterien

Die Batterie wurde vom Echtzeitsimulator Typhoon HIL übernommen, damit sie in Simulink modelliert werden kann. Die Batterie wird als gesteuerte Spannungsquelle mit einem Reihenwiderstand ausgeführt. Der Innenwiderstand von der Batterie ist temperatur- und spannungsabhängig. In diesem Modell wird die Temperaturschwankung nicht berücksichtigt. Die Formeln sind aus der Bibliothek von Typhoon HIL [8].

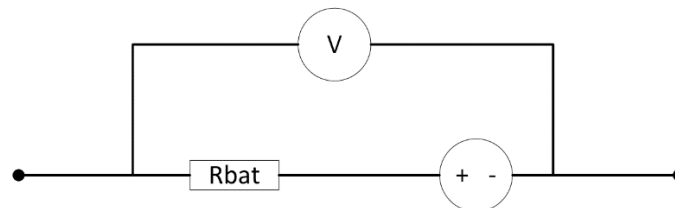


Abbildung 21: Schematischer Aufbau einer realen Batterie

$$E = E0 * K * \frac{Q}{Q - it} + A * e^{-it*B}$$

$$it = \int_0^t i_{bat} * dt$$

Spannungsabfall während der Exponentialzone:

$$A = E_{full} - E_{exp}$$

Ladung am Ende der Exponentialzone:

$$B = \frac{3}{Q_{exp}}$$

Polarisationsspannung:

$$K = \frac{(E_{full} - E_{nom} + A * (e^{-B*Q_{nom}} - 1)) * (Q - Q_{nom})}{Q_{nom}}$$

$$E0 = E_{full} + K + R_{bat} * i - A$$

$$R_{bat} = U_{nom} \frac{1 - 0.995}{0.2 * Q_{nom}}$$

Der Ladestatus SOC (State of charge output) wird mit der folgenden Formel ausgerechnet:

$$SOC = \left(1 - \frac{it}{Q}\right) * 100[\%]$$

Für die Initialisierung wird der Integrator auf eine Anfangsbedingung eingestellt.

$$Anfangsbedingung = \left(1 - \frac{SOC_{init}}{100}\right) * Q$$

Abkürzung	Bezeichnung	Wert
Q	Kapazität	1.2 [Ah]
V <sub>nom</sub>	Nennspannung	12 [V]
V <sub>full</sub>	Volle Ladespannung	108 [%]
Q <sub>nom</sub>	Kapazität bei Nennspannung	50 [%]
Q <sub>exp</sub>	Kapazität in der Exponentialzone	0.9 [%]
V <sub>exp</sub>	Spannung an der Exponentialzone	102.5 [%]
R <sub>bat</sub>	Widerstand der Batterie	0.1 [ $\Omega$ ]

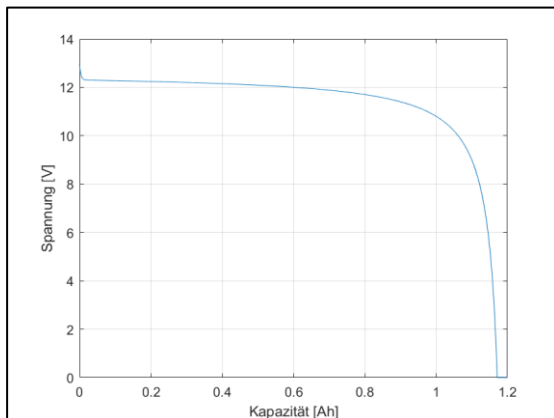


Abbildung 23: Batterie Entladekurve mit Matlab

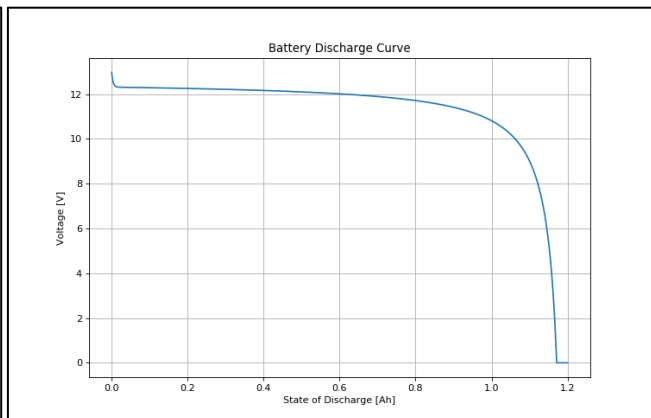


Abbildung 22: Batterie Entladekurve mit Typhoon HIL

Die Entladekurven stimmen sehr gut miteinander überein. Damit wird sichergestellt, dass die Batterie in Simulink ebenfalls funktioniert.

## 5.2 Vordimensionierung

Für die Simulationen hat man die Werte von zwei Aufzügen genommen, die in Betrieb sind. Da der Wirkungsgrad nicht bekannt ist, hat man die oben definierten Wirkungsgrade im System eingefügt. Die Simulationen werden immer mit Aufzug Nr.1 oder Aufzug Nr.2 beschriftet.

### 5.2.1 Aufzug Nr.1

Das Datenblatt des ersten Aufzugs ist:

Abkürzung	Bezeichnung	Wert
h	Maximale Höhe	18 [m]
nS	Anz. Stockwerke	5
vmax	Maximale Geschwindigkeit	1 [m/s]
amax	Maximale Beschleunigung	0.5[m/s <sup>2</sup> ]
mP	Maximale Masse der Personen	320 [Kg]
mG	Masse des Gegengewichts	820 [Kg]
mK	Masse der Kabine	660 [Kg]
d	Durchmesser Treibscheibe	320 [mm]
i	Übersetzungsverhältnis Getriebe	-
ηladen ηentladen	Wirkungsgrad für das Laden und entladen des ESS	65 [%]

Damit die maximale Leistung und Energie berechnet werden kann, wurden folgende Gleichungen verwendet:

Für die Spitzenleistung gilt:

$$P_{max}(\text{Aufzug}) = F_{tmax} * v_{max} \\ = [(m_P + m_K + m_G) * a_{max} + (m_P + m_K - m_G) * g] * v_{max}$$

Die Geschwindigkeit wird immer positiv genommen.

Die Nennleistung hat man bei konstanter Geschwindigkeit. Dadurch fällt der Term mit der Beschleunigung weg:

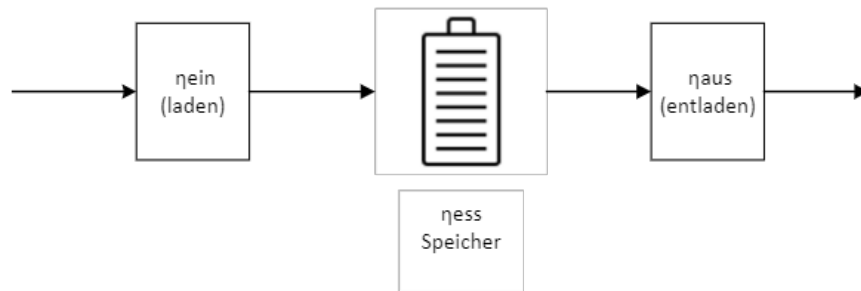
$$P_n(\text{Aufzug}) = (m_P + m_K - m_G) * g * v_{max}$$

Da der Aufzug vertikal bewegt wird, kann die Energie als potenzielle Energie berechnet werden:

$$W = (m_P + m_K - m_G) * g * \Delta h$$

Für die Energien und Leistungen des Energiespeichers wird der Wirkungsgrad hinzugefügt.





Die Formel wird zur Vereinfachung mit der Variabel  $x$  ausgedrückt, damit nicht explizit alle Gleichungen aufgeführt werden müssen:

$$x_{Laden} = x * \eta_{ein}$$

$$x_{Entladen} = \frac{x}{\eta_{aus}}$$

Für die Auswertung wird eine Graphik mit der Leistung und der Energie anhand verschiedener Massen in der Kabine dargestellt.

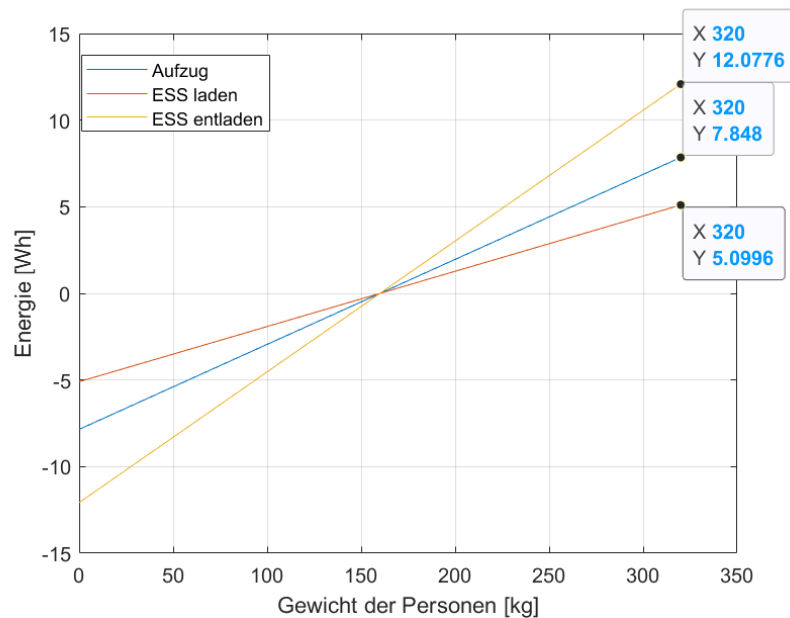


Abbildung 24: Energiespeicherung [Aufzug Nr.1]

Falls das Energiespeichersystem die gesamte Energie für den Aufzug aufbringen müsste, muss der Speicher mind. 12Wh und vollgeladen sein. Hingegen kann beim Speichern maximal 5Wh aufgenommen werden, da das System Verluste hat. Der Gewichtsunterschied zwischen der Kabine und dem Gegengewicht beträgt die Hälfte vom maximalen Zulassungsgewicht der Last.

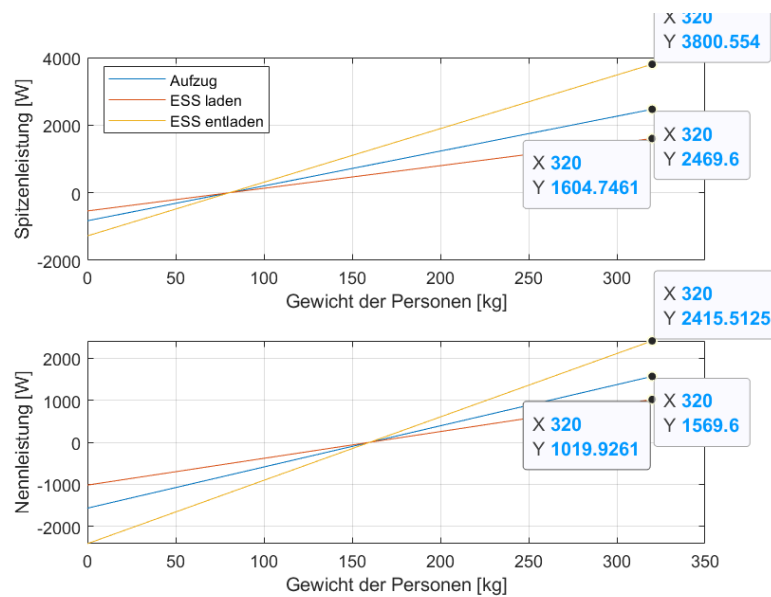


Abbildung 25: Leistung für die Energiespeicherung [Aufzug Nr.1]

Die Spitzenleistungen sind um einiges grösser als die Nennleistungen. Wenn die Geschwindigkeit negativ ist, werden die Kurven an der x-Achse gespiegelt.

### 5.2.2 Aufzug Nr.2

Für das zweite Beispiel wird ein getriebeloser Aufzug verwendet:

Abkürzung	Bezeichnung	Wert
h	Maximale Höhe	18 [m]
nS	Anz. Stockwerke	5
vmax	Maximale Geschwindigkeit	1 [m/s]
amax	Maximale Beschleunigung	0.5[m/s <sup>2</sup> ]
mP	Maximale Masse der Personen	320 [Kg]
mG	Masse des Gegengewichts	694 [Kg]
mK	Masse der Kabine	534 [Kg]
d	Durchmesser Treibscheibe	700 [mm]
i	Übersetzungsverhältnis Ge- triebe	45
$\eta_{\text{laden}}$ $\eta_{\text{entladen}}$	Wirkungsgrad für das Laden und entladen des ESS	52 [%]

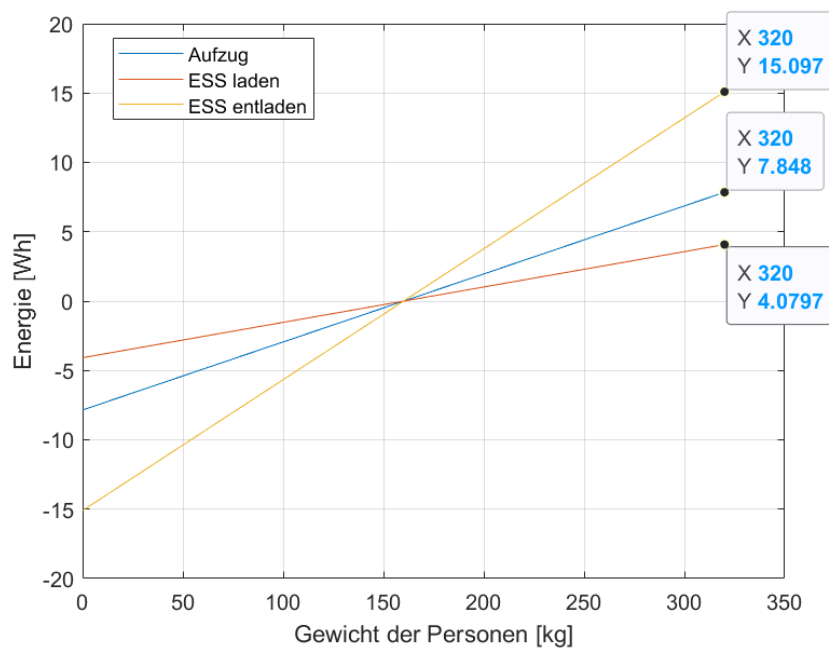


Abbildung 26: Energiespeicherung [Aufzug Nr.2]

Bei diesem Aufzug ist der Wirkungsgrad kleiner als beim ersten Aufzug, wodurch der Energiespeicher weniger Energie aufnimmt aber mehr Energie abgeben kann.

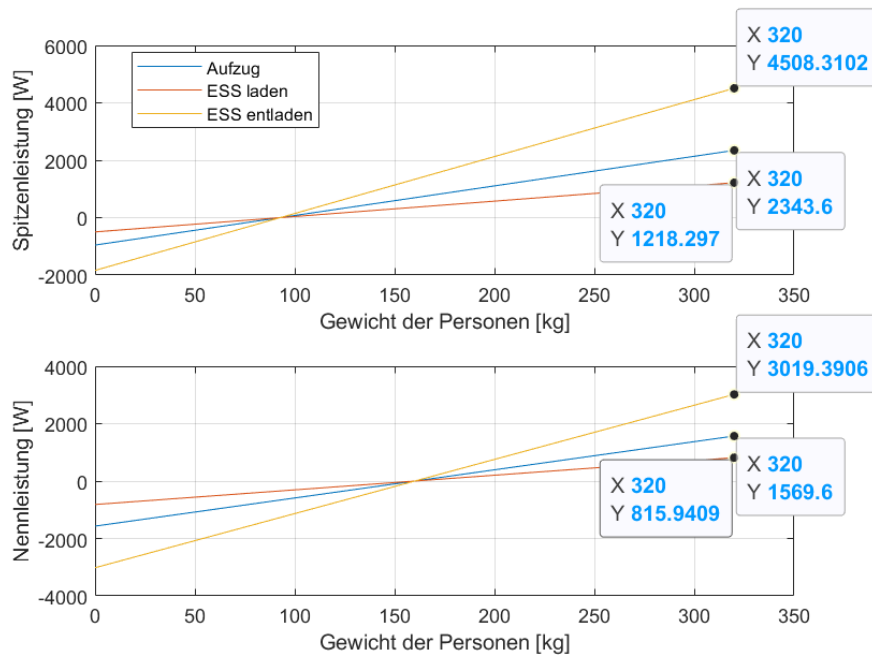


Abbildung 27: Leistung für die Energiespeicherung [Aufzug 2]

Die Leistungsspitzen auf dem Energiespeicher des zweiten Aufzugs sind grösser als beim ersten Aufzug, obwohl die Leistungsspitzen des Aufzugs kleiner sind. Die Leistungsspitzen des Aufzugs auf dem ersten Aufzug sind grösser, weil das Gegengewicht und das Gewicht der Kabine grösser sind. Jedoch ist der Wirkungsgrad beim zweiten Aufzug schlechter, wodurch auch die Leistungsspitzen des Energiespeichers grösser werden.

### 5.3 ESS auf dem Gleichspannungsbus

Der Speicher wird in dieser Schaltung direkt mit dem Bus verbunden. Das Stromnetz ist über einen DC-DC Wandler mit dem Bus angeschlossen.

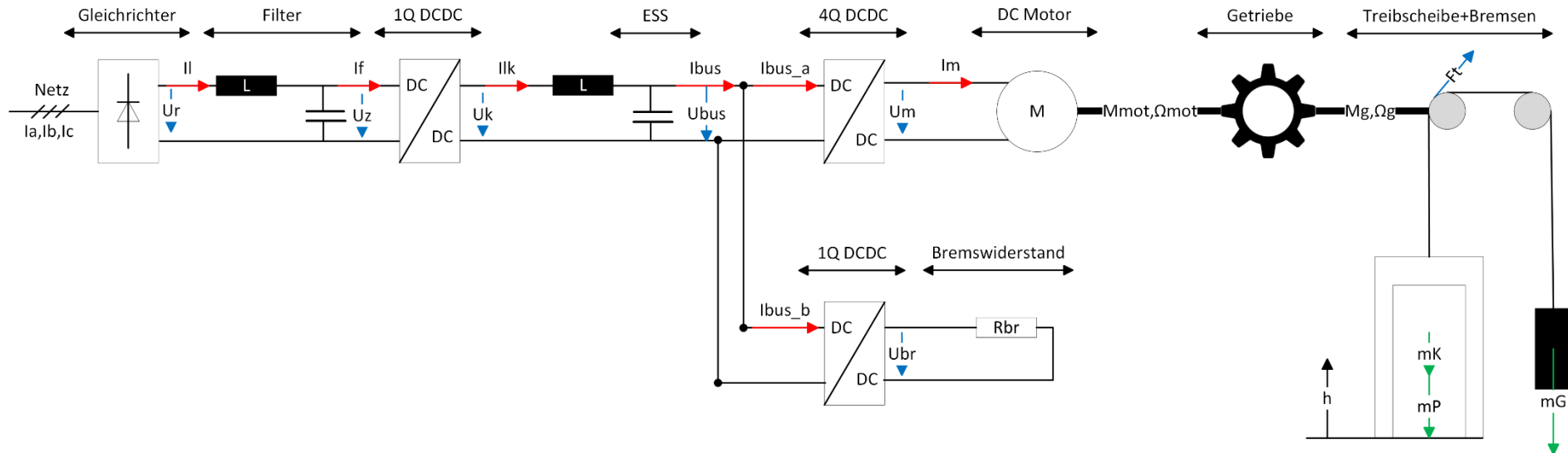


Abbildung 28: Ersatzschaltbild des ESS auf dem Gleichspannungsbus

In Simulink wurde das folgende Schema implementiert. Die genaue Beschreibung wird im weiteren Vorgehen erklärt.

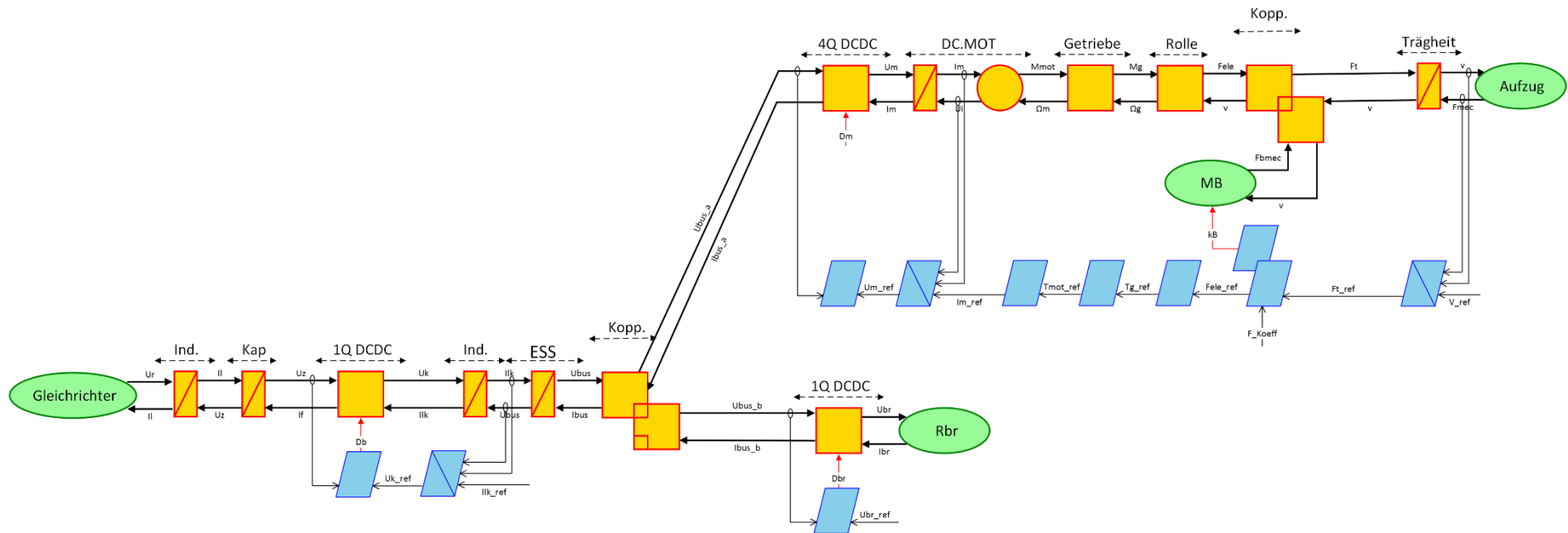


Abbildung 29: Blockdiagramm des ESS auf dem Gleichspannungsbus

### 5.3.1 Regelung

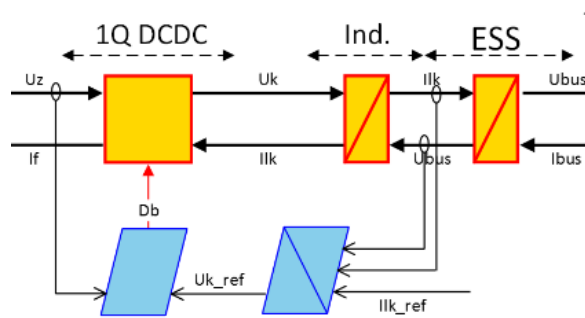


Abbildung 30: Blockdiagramm des ESS

$$U_k - U_{bus} = L * \frac{dI_{lk}}{dt} + R * I_{lk}$$

$$C_f * \frac{dU_{bus}}{dt} = I_{lk} - I_{bus}$$

Für die Regelung auf dem Gleichspannungsbus wird ein Abwärtsteller verwendet.

$$Db = \frac{T_{1on}}{T} \quad 0 < Db < 1$$

$$Db = \frac{T_{on}}{T} = \frac{U_{k\_ref}}{U_{z\_mes}}$$

Das System wird mit einem PI-Regler gesteuert:

$$U_{k\_ref} = K_p * (I_{lk\_ref} - I_{lk\_mes}) + K_i * \int (I_{lk\_ref} - I_{lk\_mes}) * dt + U_{bus}$$

### 5.3.2 Strategie

Die Strategie für das ESS auf dem Gleichspannungsbus wurde sehr einfach implementiert. Falls der Ladestatus des Energiespeichers einen minimalen Wert erreicht hat, ladet er sich wieder teilweise auf. Sollte der Aufzug in Betrieb sein und die Leistung nicht ausreichen, so wird die Leistung auf dem Netz um 2kW erhöht.

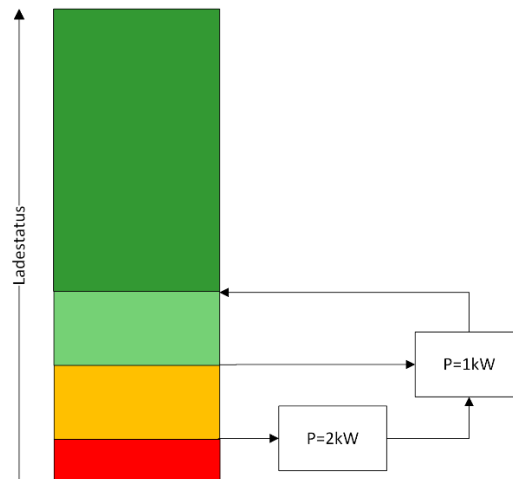


Abbildung 31: Strategie ESS

### 5.3.3 Superkondensator auf dem DC Bus

Warum sollte die Gleichspannung auf dem DC-Bus möglichst hoch sein? In dieser Arbeit wurde ein Gleichstrommotor verwendet, mit welchem die Frage einfach erklärt werden kann. Wenn die Spannungsverluste über dem Widerstand und der Induktivität vernachlässigt werden, kann die induzierte Spannung ( $U_i$ ) maximal so gross wie die Spannung auf dem Gleichspannungsbuss werden. Der Motor sollte möglichst klein dimensioniert werden und einen guten Wirkungsgrad aufweisen. Um diese Bedingungen zu erfüllen, muss der Strom im Motor möglichst klein sein.

Wird die Spannung auf dem Bus verkleinert, wird die induzierte Spannung begrenzt. In Folge muss die Drehmomentkonstante ebenfalls verkleinert werden, wodurch grössere Ströme fliessen.

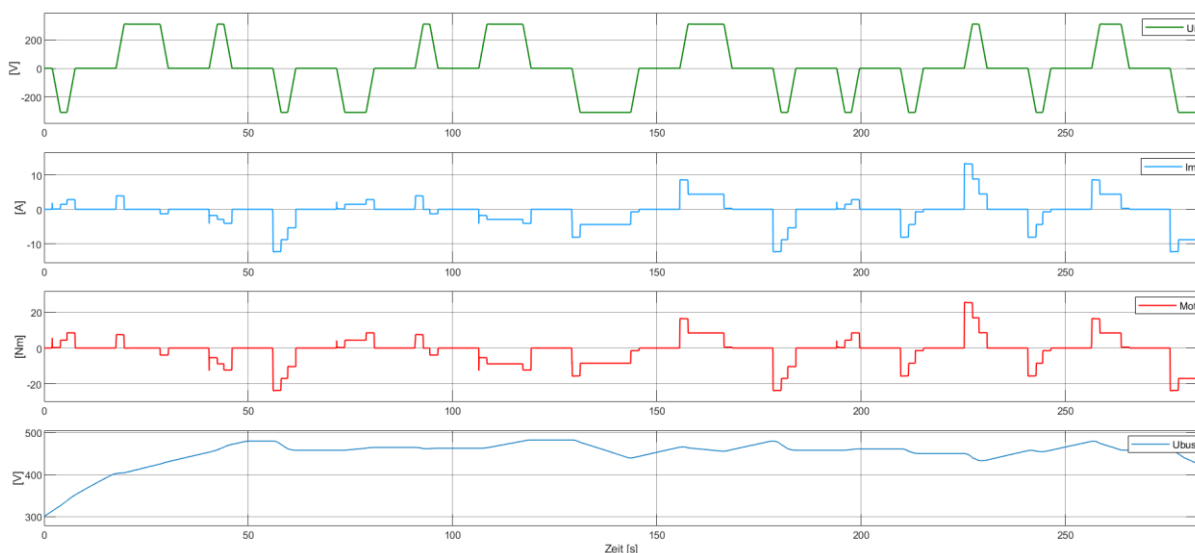


Abbildung 32: Messungen des Motors

In der Praxis werden DC-AC Wandler verwendet. Der Motor ist ein dreiphasiger Drehstrommotor. Die Auswirkungen des Gleichspannungsbusses mit einer tiefen Spannung bleiben dieselben.

Die Leistungsspitzen auf dem Superkondensator sind sehr gross. Damit diese verkleinert werden können, muss ein gewisser Teil der Energie aus dem Netz kompensiert werden. Die in Rot eingezeichneten Messungen im untenstehenden Diagramm veranschaulichen dies. Jedoch ist diese Variante eher



schwierig, weil der Energiespeicher primär- und das Netz sekundärseitig wirkt. Im Fehlerfall oder bei einer schlechten Regelung wird die gesamte Leistung auf den Energiespeicher übertragen.

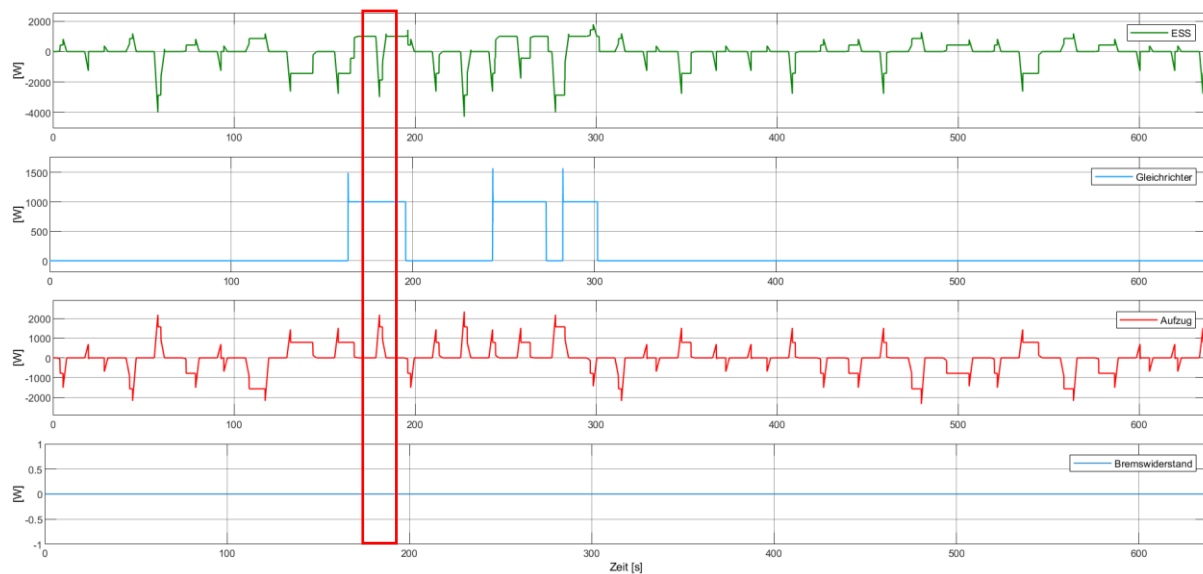


Abbildung 33: Superkondensator mit 1 Farad [Aufzug Nr.2]

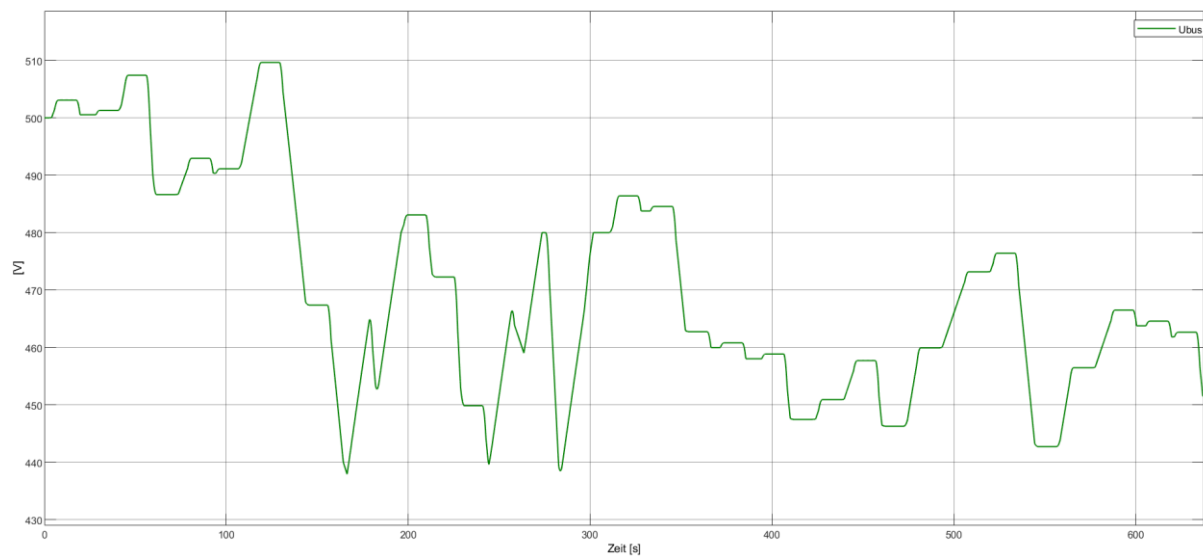


Abbildung 34: Gleichspannungsbuss

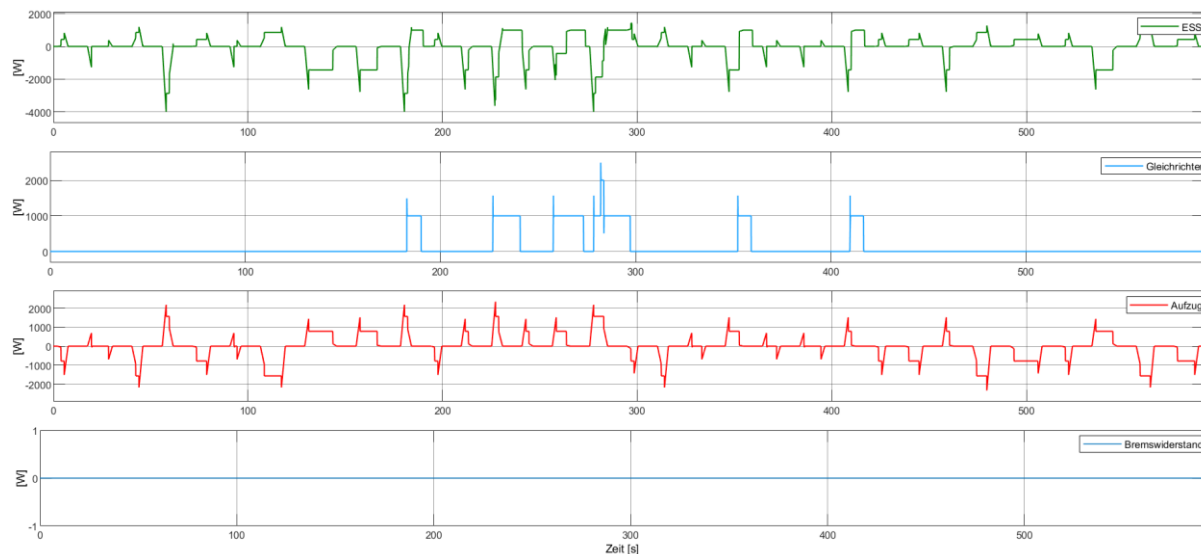
Wenn sich die Spannung am Superkondensator nur zwischen 510 und 440 V bewegt, ist der Superkondensator völlig überdimensioniert. Abhilfe könnte eine Batterie verschaffen, welche eine konstantere Spannung aufweist. Die Entladungstiefe (Depth of Discharge, DoD) des Superkondensators kann anhand des Spannungsprofils berechnet werden:

$$DoD = \left( 1 - \left( \frac{U_{bus\_min}}{U_{bus\_max}} \right)^2 \right) = \left( 1 - \left( \frac{440}{510} \right)^2 \right) = 25.5\%$$

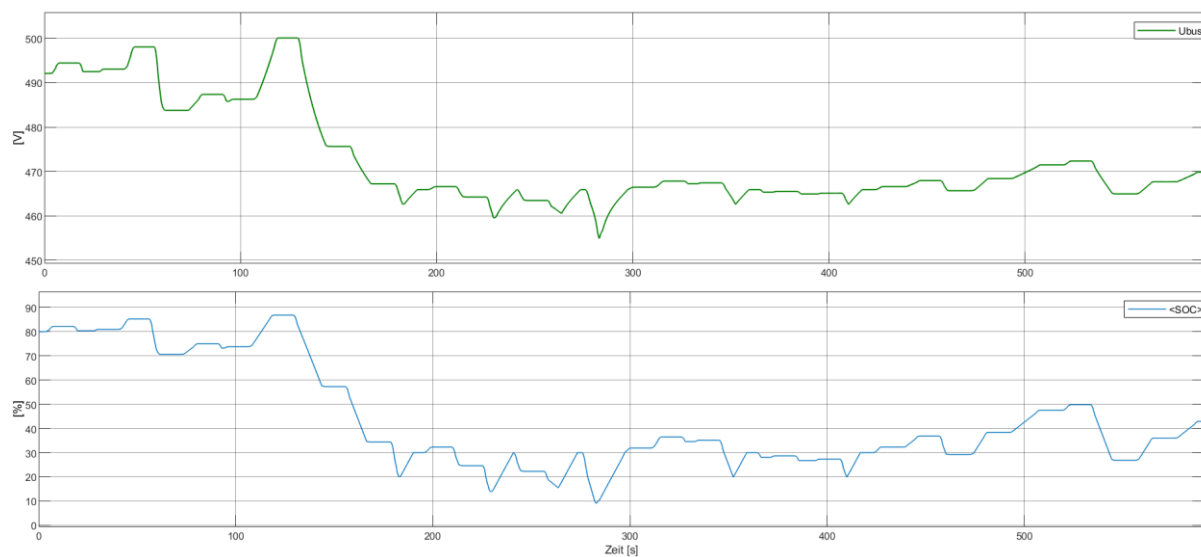
Hinzu kommt, dass die Spannung für einen Superkondensator sehr hoch ist.

### 5.3.4 Batterie auf dem DC Bus

Für die untenstehenden Messungen wurde eine Lithium-Ionen-Batterie mit einer Nennspannung von 400V und einer Kapazität von 0.04Ah ausgewählt.



Der Bremswiderstand wird, wie bereits mit dem Superkondensator, nicht benötigt. Im Gleichrichter stieg die Leistung einmal auf 2kW an, da sich die Batterie sehr tief entladen hat.



Mit diesem System hat man wieder dasselbe Problem, welches bereits beim Superkondensator erwähnt wurde. Das Netz wirkt sekundär- und der Energiespeicher primärseitig.

Die Batterie wird bis auf 10% entladen, was gegenüber dem Superkondensator ein grosser Vorteil ist. Da das Netz zusätzlich zu einem Dioden Gleichrichter auch an einen Gleichspannungswandler angeschlossen werden muss, entstehen zusätzliche Verluste. Weil die Leistungsdichte von den Lithium Batterien gegenüber den Superkondensatoren kleiner ist, zeigt sich, dass die Superkondensatoren besser parallel mit einem DC-DC Wandler angeschlossen werden sollten.

## 5.4 Energiespeichersystem parallel auf dem Gleichspannungsbus

In dieser Schaltung wird über einen Gleichspannungswandler der Energiespeicher an den Gleichspannungsbus angeschlossen.

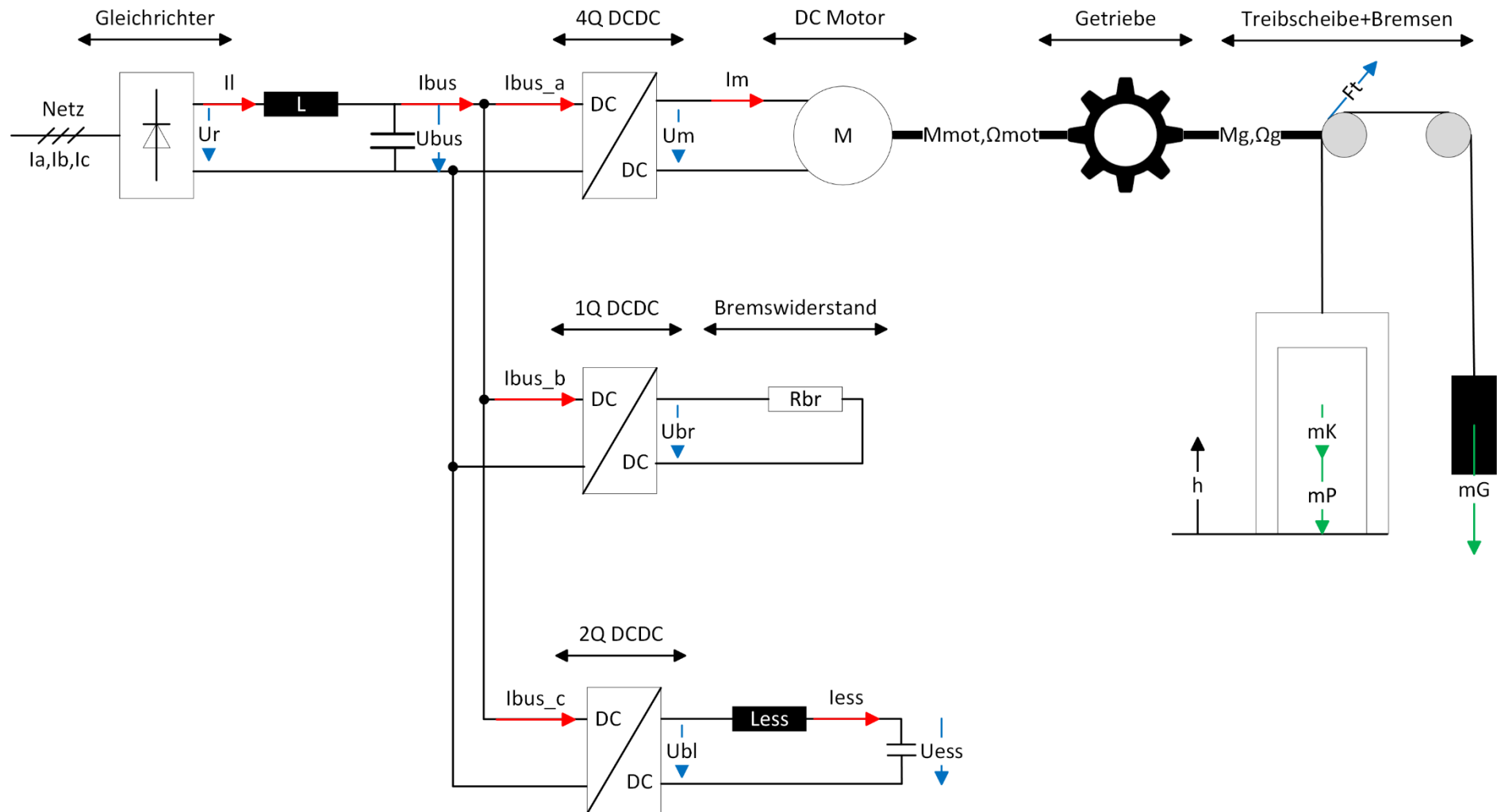


Abbildung 35: Ersatzschaltbild des Energiespeichers parallel auf dem Gleichspannungsbus

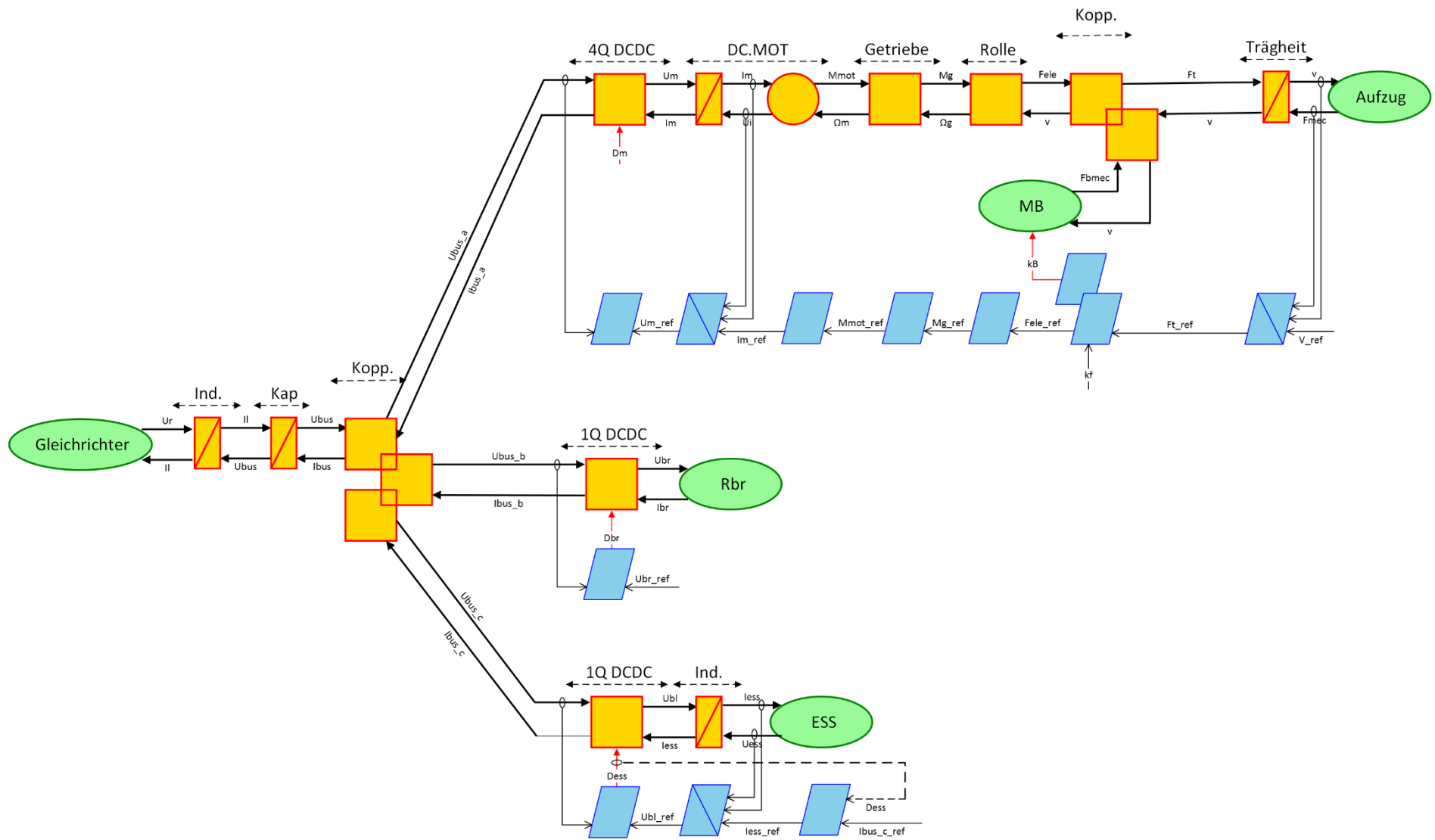


Abbildung 36: Blockdiagramm des Energiespeichers parallel auf dem Gleichspannungsbus

### 5.4.1 Systemsteuerung

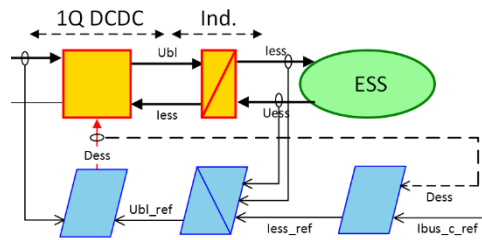


Abbildung 37: Blockdiagramm des Kondensators

Das Speichersystem wird mit einem Zweiquadrantensteller geregelt, weil der Strom umkehrbar sein muss. Zunächst wird das Tastverhältnis definiert:

$$D_{ess} = \frac{T_{1on}}{T} \quad 0 < D_{ess} < 1$$

$$U_{bl} = U_{bus} * D_{ess}$$

$$I_{bus\_c} = I_{ess} * D_{ess}$$

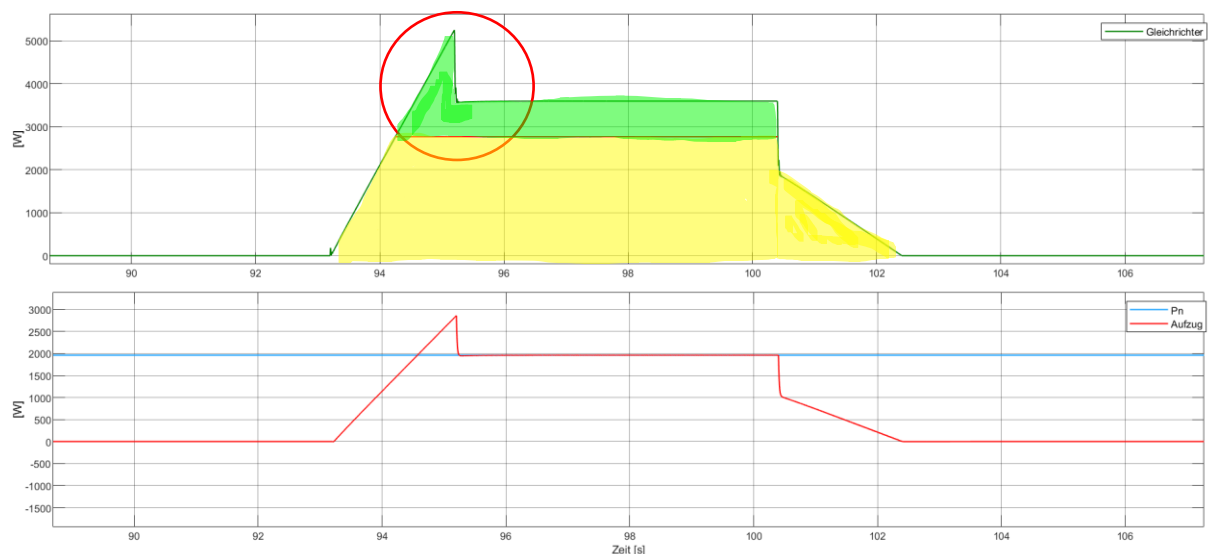
$$D_{ess} = \frac{U_{bl}}{U_{bus\_mes}}$$

Die Referenzspannung ( $U_{bl}$ ) wird mit einem PI-Regler geregelt:

$$U_{bl\_ref} = K_p * (I_{ess\_ref} - I_{ess\_mes}) + K_i * \int (I_{ess\_ref} - I_{ess\_mes}) * dt + U_{ess\_mes}$$

$$I_{ess\_ref} = \frac{I_{bus\_c\_ref}}{D_{ess}}$$

### 5.4.2 Strategie



Das Ziel ist es, die Leistungsspitzen auf dem Netz zu reduzieren. Deshalb wird nach einer gewissen Zeit das Netz vom Speicher unterstützt. Auf dem obenstehenden Diagramm ist die Energie aus dem Netz in Gelb und die Energie des Speichers in Grün eingezeichnet. [2]

Die Speicher und Entladevorgänge werden nun etwas genauer erklärt:

#### Speichern:

Es wird die gesamte Energie gespeichert, die der Aufzug erzeugt. Sollte der Energiespeicher voll sein, wird die Energie vom Bremswiderstand verbraucht. Ist der Ladestatus nach einer Fahrt zu tief, so wird der Speicher nachgeladen.

#### Entladen:

Sobald 75% von der Leistung bei konstanter Geschwindigkeit erreicht ist, wird die fehlende Energie aus dem Speicher kompensiert.

### **5.4.3 Dimensionierung**

Für die nächsten Formeln wurde ein Sicherheitsfaktor (sf) und ein Faktor (kf) eingeführt. Mit dem Faktor (kf) kann eine Leistung gegenüber der Leistung bei konstanter Geschwindigkeit eingestellt werden. Wird zum Beispiel nur die Leistungsspitze reduziert, wird der Faktor auf 1 eingestellt. Wenn die gesamte Energie übertragen werden möchte, ist der Faktor 0.

Die maximale Leistung im Energiespeichersystem beträgt:

$$PESS = (P_{max} - P_n * kf) * sf$$

Nach jeder Fahrt wird der Speicher, um die Hälfte seiner Speicherkapazität nachgeladen. Die gesamte Speicherkapazität entspricht der Hälfte von der maximalen benötigten Energie während einer Fahrt.

$$E_{ess} = E_{max} * 0.5$$

Die minimale Spannung für den Kondensator nach einer Fahrt ist:

$$U_{ess_{min}} = (1 - DoD) * U_{ess_{max}}^2 [5]$$

Bezeichnung	Abkürzung	Wert + Einheit
Maximale Speicherleistung	PESS	2531.4 [W]
Maximale Leistung auf dem Gleichspannungsbuss	Pmax	3800 [W]
Nominale Leistung	Pn	2415 [W]
Sicherheitsfaktor	sf	1.2
Prozentualer Faktor der Nennleistung	kf	70 [%]
Maximal benötigte Energie während einer Fahrt	E <sub>max</sub>	12.07 [Wh]
Speicherkapazität des Energiespeichers	E <sub>ess</sub>	6.035 [Wh]
Speicherkapazität des Kondensators	C <sub>ess</sub>	4.334 [F]
Nominale Spannung des Energiespeichers	U <sub>ess</sub>	100 [V]

Abbildung 38: [Aufzug Nr.1]

Der Faktor (kf) wurde durch Erproben auf 0.7 eingestellt.

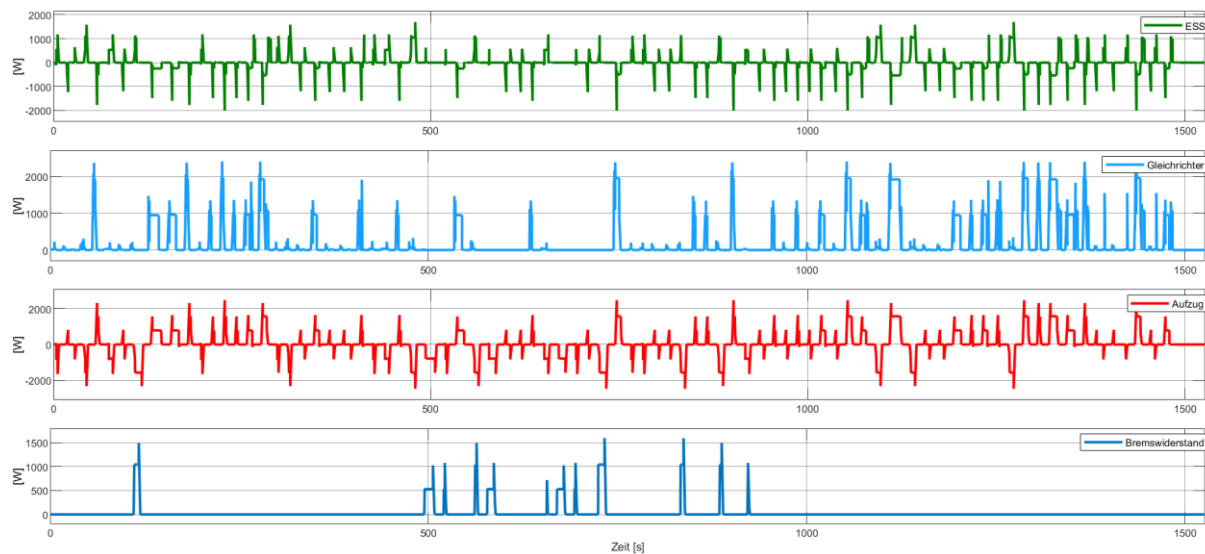


Abbildung 39: Leistungskurven mit dem Superkondensator als Energiespeicher [Aufzug Nr.1]

Die Leistungsspitzen auf dem Netz werden immer begrenzt. Somit wird das erste Kriterium zur Begrenzung der Leistungsspitzen erfüllt. Der Bremswiderstand verbraucht Energie, weil der Speicher voll ist. Wenn in diesem Zyklus die gesamte Energie gespeichert werden will, muss die Speicherkapazität erhöht werden. Der Energieverbrauch des Stromnetzes beträgt 91.36Wh und im Bremswiderstand 15.6Wh.

Die berechneten Leistungsspitzen auf dem Energiespeicher werden nicht überschritten.

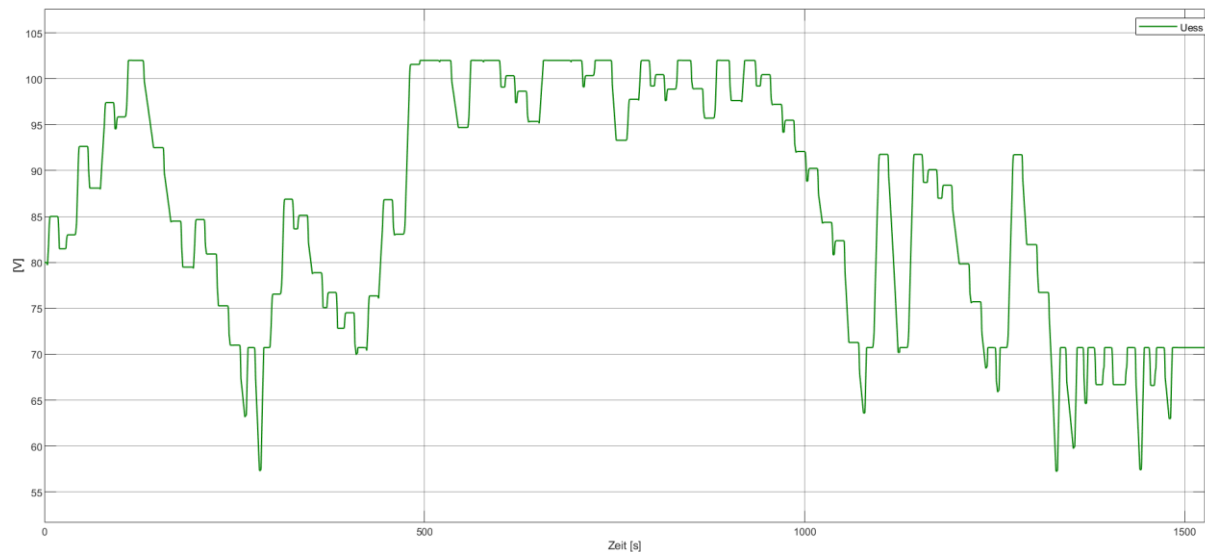


Abbildung 40: Spannungsverlauf des Superkondensators

Der Kondensator muss nach dem Fahrzyklus mehrmals nachgeladen werden. Die Spannung des Kondensators ist immer höher als 55V.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert + Einheit
Maximale Speicherleistung	PESS	2873 [W]
Maximale Leistung auf dem Gleichspannungsbus	Pmax	4508[W]
Nominale Leistung	Pn	3019 [W]
Sicherheitsfaktor	sf	1.2
Prozentualer Faktor der Nennleistung	kf	70 [%]
Maximal benötigte Energie während einer Fahrt	E <sub>max</sub>	15.097 [Wh]
Speicherkapazität des Energiespeichers	E <sub>ess</sub>	7.5485 [Wh]
Speicherkapazität des Kondensators	C <sub>ess</sub>	5.43 [F]
Nominale Spannung des Energiespeichers	U <sub>ess</sub>	100 [V]

Abbildung 41: [Aufzug Nr.2]

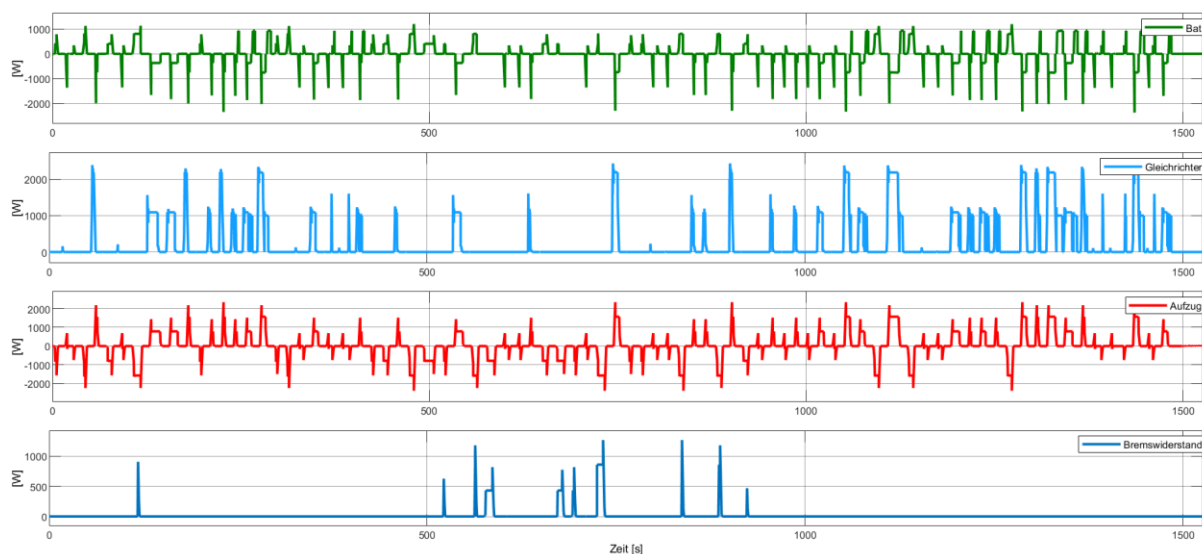


Abbildung 42: Leistungskurven mit dem Superkondensator als Energiespeicher [Aufzug Nr.2]

Auch in dieser Simulation werden die berechneten Leistungsspitzen nicht überschritten. Wenn die maximale Leistungsspitzen auf dem Energiespeicher des zweiten Aufzugs mit dem ersten verglichen werden, ist ersichtlich, dass die Spitzen im zweiten Aufzug grösser sind. Dies ist normal, weil der Wirkungsgrad des zweiten Aufzugs schlechter ist. Hingegen ist die Leistungsaufnahme im zweiten Speicher kleiner. Damit wird klar, dass bei einem schlechteren Wirkungsgrad der Energiespeicher zusätzlich mit dem Stromnetz aufgeladen werden muss, weil auch weniger zurückgespeist wird. Möchte man dies ändern, muss der Faktor (kf) vergrössert werden. Wenn dieser Faktor jedoch vergrössert wird, wird die Leistung auf dem Netz grösser und der Speicher zu gross



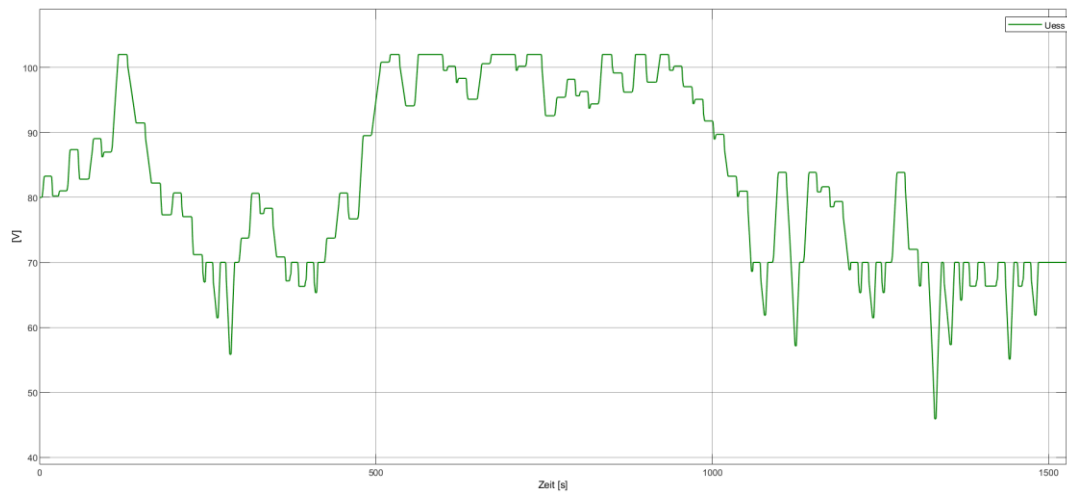


Abbildung 43: Spannungsverlauf des Superkondensators

Der Speicher muss bei diesem Aufzug vermehrt nachgeladen werden.

## 6 Typhoon HIL

### 6.1 Modell Typhoon HIL

Das Schema wird mit Typhoon HIL modelliert. Das Prinzipschema ist dasselbe, wie bereits in Simulink modelliert wurde. Die mechanische Einrichtung des Aufzugs wurde wie in Matlab-Simulink modelliert. Für die Modellierung des elektrischen Teils existieren in der Bibliothek von Typhoon verschiedene Komponenten. Hier besteht auch der Unterschied von Simulink zu Typhoon. Mit Simulink können die Kommutierungen des Wandlers nicht erstellt werden, mit Typhoon ist dies jedoch möglich. Mit dem Echtzeitsimulator von Typhoon werden die Kommutierungen ausgeführt und die Simulation läuft in Echtzeit, dadurch kann beobachtet werden, wie sich die Werte mit der Zeit ändern. In Typhoon HIL wird vor dem Gleichrichter ein Stromnetz hinzugefügt.

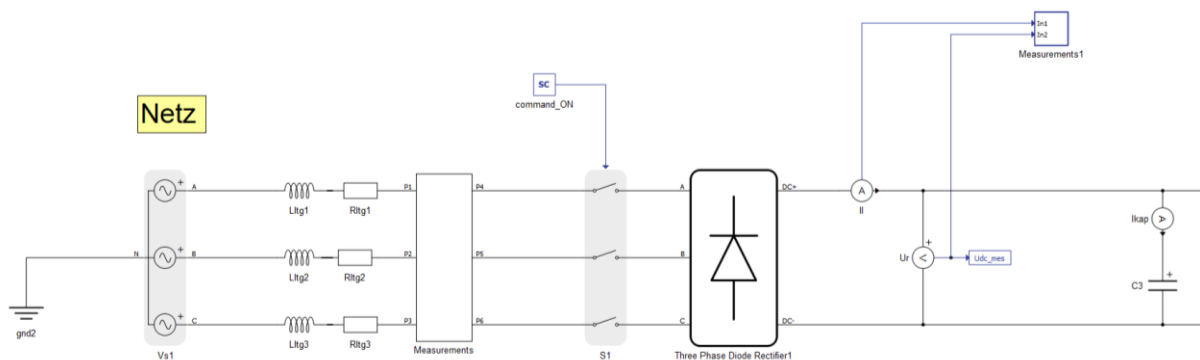


Abbildung 44: Typhoon HIL Stromnetz

Damit die Verluste im Wandler berücksichtigt werden, wurde der gemessene Strom auf dem Gleichspannungsbuss gefiltert und mit einer Stromquelle abgezogen.

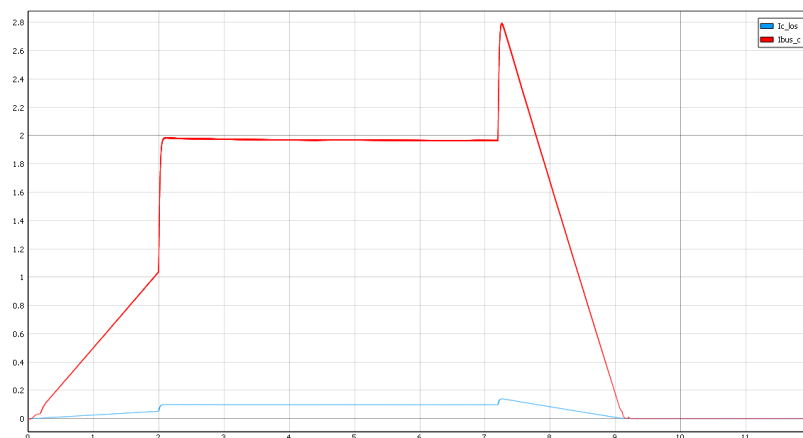


Abbildung 45: Verluste im Wandler

### 6.1.1 PI-Regler

Damit die Regelung mit einem Prozessor ausgeführt werden kann, muss der Code in C implementiert werden. Diese Arbeit wurde erstellt, damit der Code für eine reale Anwendung angewendet werden könnte. In diesem Projekt sind ausschliesslich PI Regler vorhanden. Die Übertragungsfunktion des Reglers lautet [6]:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Kp + \frac{Ki}{s}$$

Der Code für das Programm sieht wie folgt aus:

```
e=Im_ref-Im_mes;
u=u+Kpi*e+(Kii*h-Kpi)*eold;
eold=e;
Um_ref=u+Ui_mes;
```

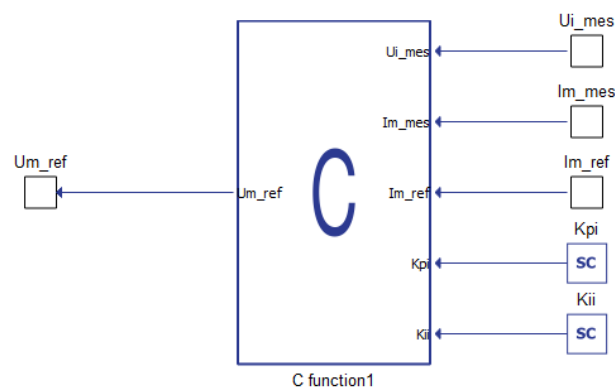


Abbildung 46: Regler für den Motorstrom

Es werden drei Regler verwendet. Ein Geschwindigkeitsregler, ein Regler für den Strom im Motor und einer für den Energiespeicher. In der untenstehenden Grafik sind die gemessene Geschwindigkeit und die Referenzgeschwindigkeit dargestellt. Der Regler funktioniert sehr gut, da der gemessene Wert sehr genau mit dem Referenzwert übereinstimmt.

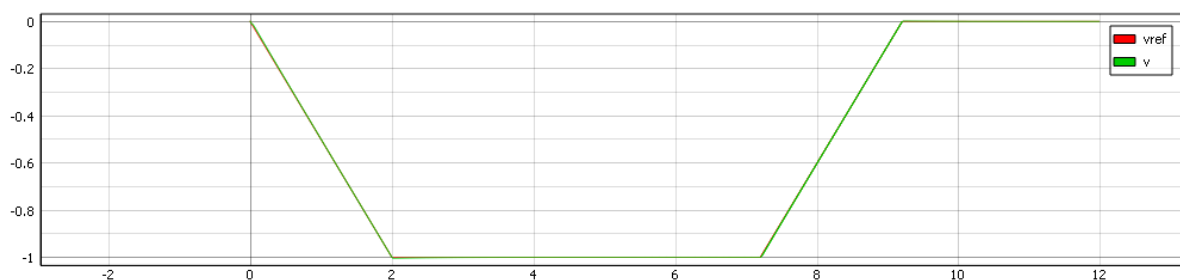


Abbildung 47: Geschwindigkeitsregelung des Antriebs

### 6.1.2 Leistungsmessung

Wenn die Energie im Speicher eingespeist wird, misst man den Strom ( $I_{bus\_a}$ ). Dieser Strom dient als Referenzstrom für die Speicherregelung. Da die Verluste im Wandler nicht berücksichtigt werden, muss das Stromnetz einen Teil ausgleichen.

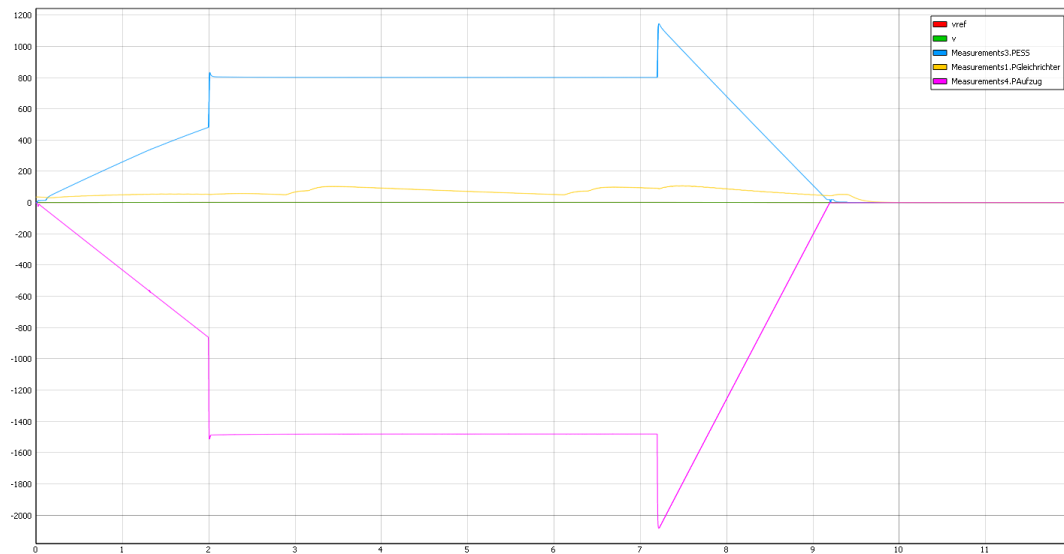


Abbildung 48: Leistungsmessung

### 6.1.3 Panel

Im Panel können die verschiedenen Werte gelesen und gespeichert werden. Zudem können die numerischen Werte der verschiedenen Regler verändert werden. Es existieren zwei Modi. Ein Manueller und ein Automatischer.

Manuell können folgende Parameter geändert werden:

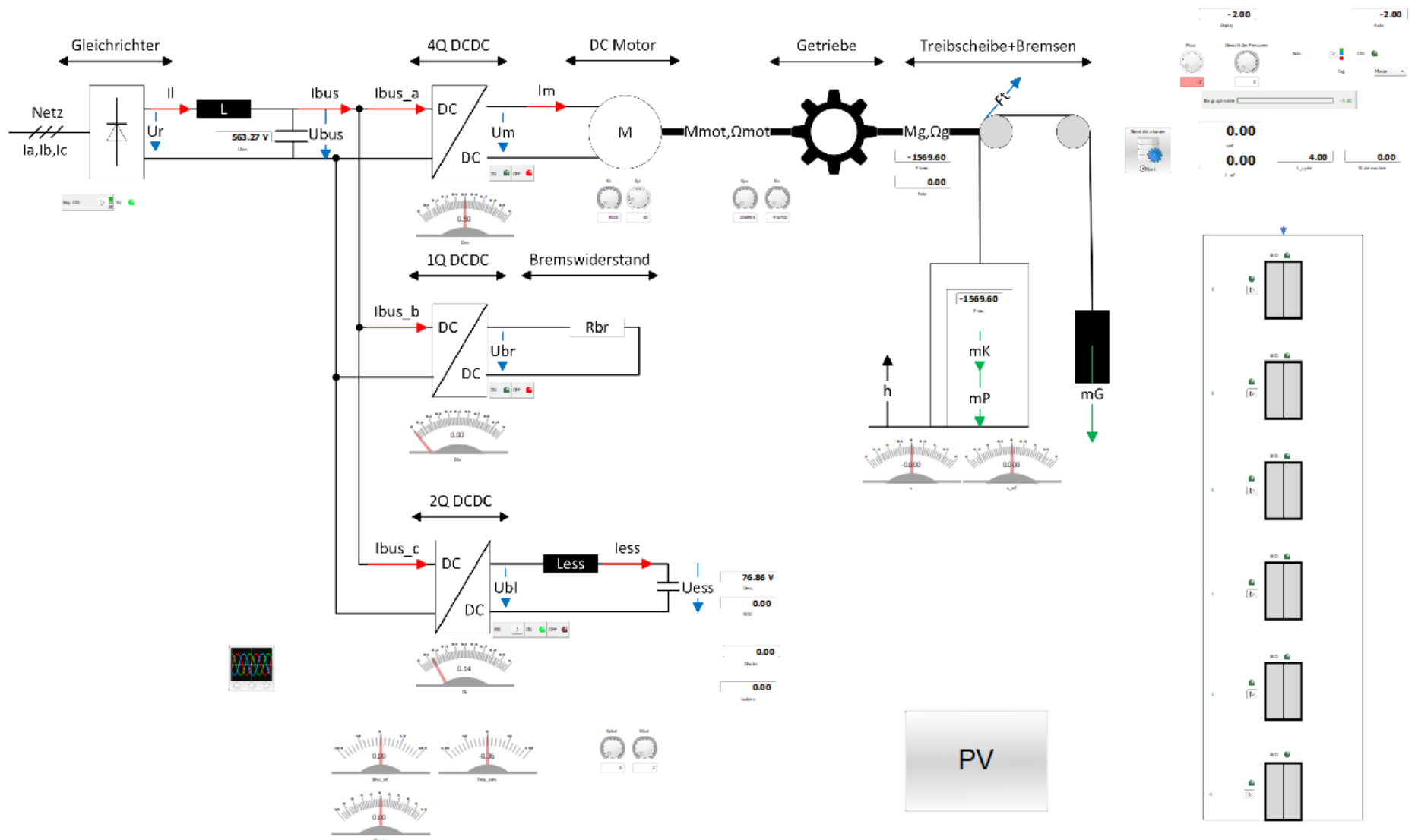
- Gewicht im Aufzug
- Stockwerk Nr.

Auf dem Panel ist schematisch ein Aufzug mit den verschiedenen Stockwerken abgebildet. Mit einem Druck auf den Knopf neben dem jeweiligen Stockwerk, bewegt sich der Aufzug in das entsprechende Stockwerk. Es können nicht mehrere Schalter gleichzeitig gedrückt werden.

Automatisch können folgende Zyklen ausgeführt werden:

- Die an einem Tag gemessenen Werte durchlaufen
- Auswahl des Fahrprofils, welches mit Matlab erstellt wurde

Die verschiedenen Werte wurden in einer Excel-Tabelle gespeichert. Mit der Programmiersprache Python wurde im Makro ein Code geschrieben, welcher die Werte liest und an die Bedienung des Aufzugs weitergibt.



## 6.2 Messungen

In dieser Grafik sind die Messungen des 1. Aufzugs dargestellt. Es wurden dieselben Fahrzyklen, wie bereits mit Simulink verwendet.

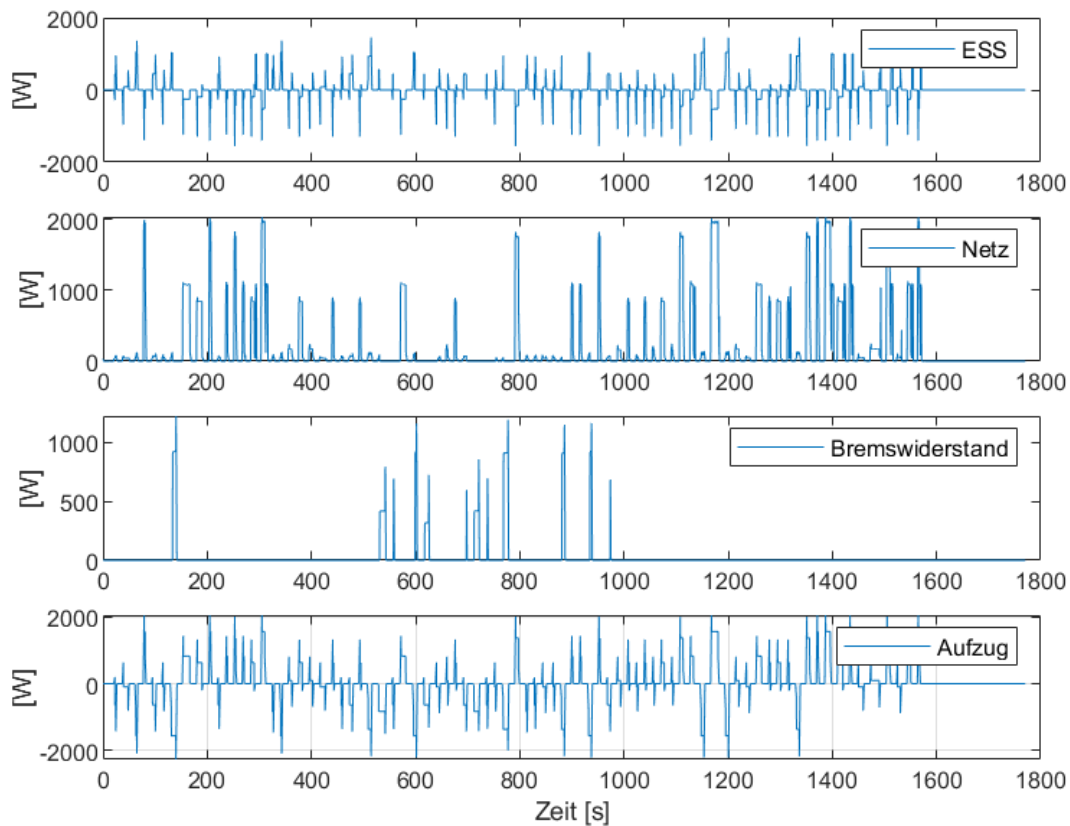


Abbildung 49: Leistungsverlauf mit dem Superkondensator als Energiespeicher [Aufzug Nr.1]

Die gemessenen Daten in Typhoon HIL wurden mit Matlab ausgewertet. Bei den 80 Fahrzyklen wurden vom Netz 97.32Wh und vom Bremswiderstand 12.05 Wh verbraucht. Auf dem Stromnetz werden alle Leistungsspitzen reduziert.

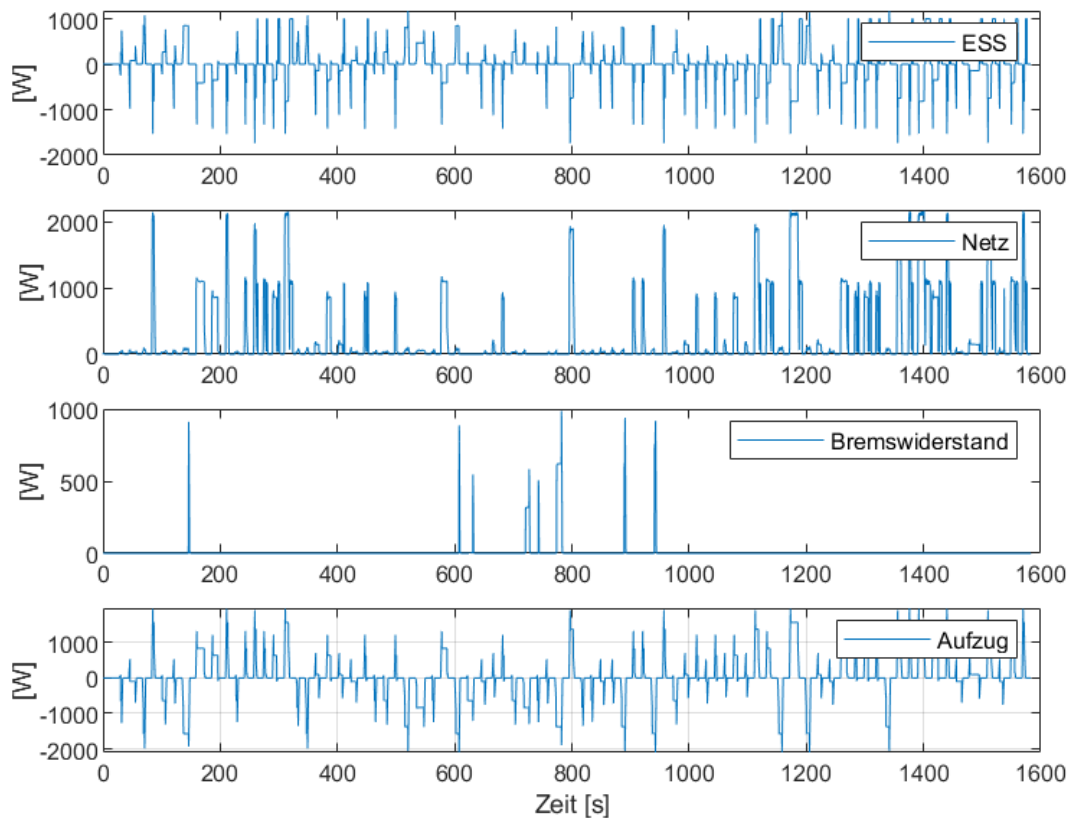


Abbildung 50: Leistungsverlauf mit dem Superkondensator als Energiespeicher [Aufzug Nr.2]

Die verbrauchte Energie im Stromnetz beträgt 112.69Wh und im Bremswiderstand 4.09Wh. Damit herausgefunden werden kann, wie viel Energie bei einem realen Fahrzyklus verloren geht, hat man mit den gemessenen Fahrzyklen eine neue Messung ausgeführt:

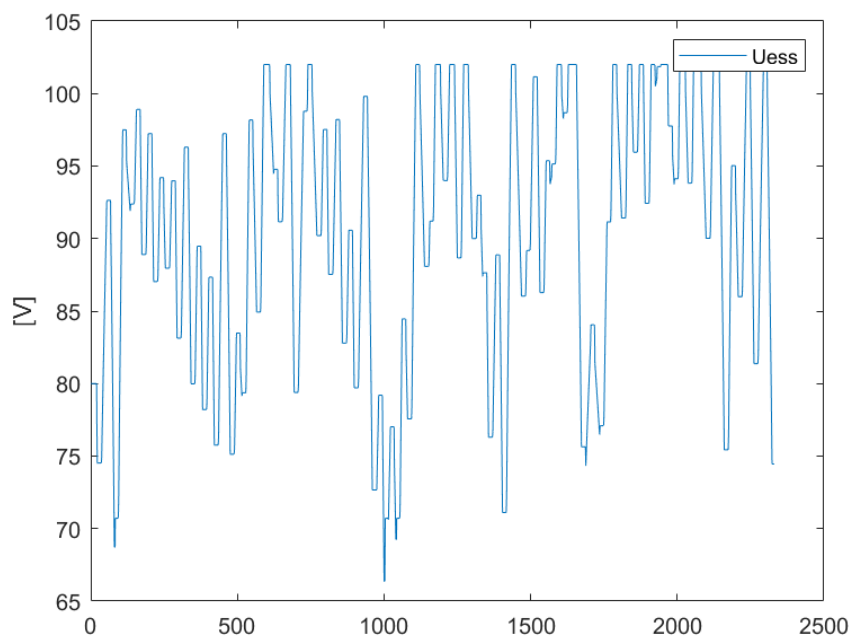


Abbildung 51: Messungen der Fahrzyklen mit dem Superkondensator [Aufzug Nr.2]



Die verbrauchte Energie im Stromnetz beträgt 215.5Wh und im Bremswiderstand 11.3Wh. In der Simulation vorher war das Verhältnis zwischen der verlorenen Energie im Bremswiderstand zur Energie im Stromnetz bei 3.6%. In diesem Fall beträgt das Verhältnis 5.2%. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Energiemanagementstrategie bei realen Fahrzyklen nicht besser funktionieren wird.

### 6.3 Optimierung der Dimensionierung

Da der Bremswiderstand ziemlich viel Energie verbraucht, wird die Energiemanagementstrategie optimiert.

Für die Optimierung der Strategie, hat man den Faktor (kf) variiert. Je grösser die Spannung wird, desto kleiner wird der Faktor (kf).

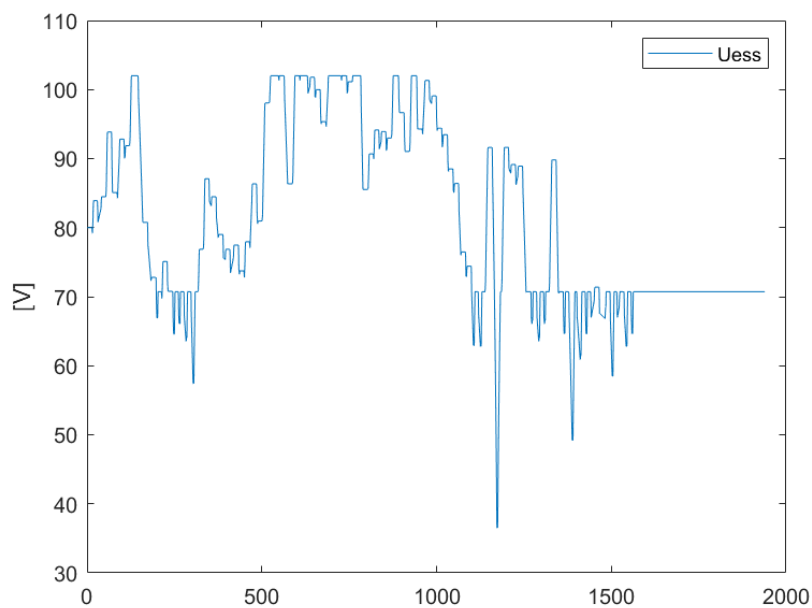


Abbildung 52: Messungen mit dem Superkondensator [Aufzug Nr.1]

Energie Bremswiderstand: 9.1Wh

Energie Stromnetz: 95.4Wh

Die Energie im Bremswiderstand und im Stromnetz reduziert sich bei der Messung auf der Abbildung 52 im Vergleich zur Abbildung 49. Jedoch könnte die verbrauchte Energie im Bremswiderstand noch kleiner sein. Mit der Reduktion des Faktors (kf) werden die Leistungsspitzen auf dem Netz vergrößert.

## 7 Schlussfolgerung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden eine Analyse und eine Modellierung eines elektromechanischen Aufzugssystems erstellt. Bei der Modellierung ist es wichtig, dass die physikalischen Eigenschaften eines Aufzugs verstanden werden. Dabei sollten nur die Parameter berücksichtigt werden, welche für das System relevant sind. Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Energiespeicher zu implementieren und nicht ein Aufzugssystem zu optimieren.

Anhand von bereits durchgeführten Messungen an einem Aufzug konnten verschiedene Details festgestellt werden. Bei einem Aufzug wird auch eine Positionsregelung implementiert, damit immer die Position der Höhe erreicht wird. In den Simulationen dieser Arbeit wird dies jedoch nicht berücksichtigt, weil die Positionsregelung nur einen kleinen Einfluss auf die Geschwindigkeitsregelung hat. Die vorhandenen Fahrzyklen konnten für die Simulationen benutzt werden. Die Dimensionierung und die Strategie des Energiespeichers bestehen aus einem geschlossenen Kreis. Man kann mit der Dimensionierung beginnen und daraus eine Strategie entwerfen oder auch anhand einer Strategie die Dimensionierung des Energiespeichers realisieren.

Es wurden zwei verschiedene Schaltungen erstellt.

In der ersten Schaltung befindet sich der Energiespeicher auf dem Gleichspannungsbus. Die Schaltung wurde in Simulink erstellt und später dimensioniert. Dabei hat man festgestellt, dass die Speicher sehr gross dimensioniert werden müssen. Da das Netz zusätzlich zu einem Dioden Gleichrichter auch an einen Gleichspannungswandler angeschlossen werden muss, entstehen zusätzliche Verluste. In der zweiten Schaltung ist der Energiespeicher parallel auf dem Gleichspannungsbus. Die Auswahl der Technologie wurde mit dem Ragone Diagramm und anhand verschiedener Kriterien getroffen. Die Lösung für die zweite Schaltung sind Superkondensatoren, da diese eine hohe Leistungsdichte und einen guten Wirkungsgrad aufweisen. Jedoch ist die Energiedichte kleiner als die von Akkumulatoren. Da die Personenaufzüge nicht so viel Energie benötigen, kann der Nachteil der Energiedichte vernachlässigt werden. Bei der Energiemanagementstrategie hat man sich entschieden, die Leistungsspitzen auf dem Netz zu reduzieren. Damit dies möglich ist, wird der Speicher nach der Fahrt falls notwendig wieder nachgeladen.

Anhand der Modellierung konnte die Schaltung mit Matlab-Simulink getestet werden. Matlab-Simulink ist ein interessantes Programm, weil damit das Modell viel schneller als mit dem Echtzeitsimulator von Typhoon HIL erstellt und getestet werden kann. Dank den Resultaten von Matlab-Simulink konnte man sich eine Energiemanagementstrategie zurechtlegen.

Sobald der Zusammenhang vom System verstanden wurde, konnte man die Modellierung mit Typhoon HIL beginnen. Die mechanische Einrichtung des Aufzugs wurde wie in Matlab-Simulink modelliert. Für die Modellierung des elektrischen Teils existieren in der Bibliothek von Typhoon verschiedene Komponenten. Hier besteht auch der Unterschied von Simulink zu Typhoon. Mit Simulink können die Kommutierungen des Wandlers nicht erstellt werden, mit Typhoon ist dies jedoch möglich. Mit dem Echtzeitsimulator von Typhoon werden die Kommutierungen ausgeführt und die Simulation läuft in Echtzeit, dadurch kann beobachtet werden, wie sich die Werte mit der Zeit ändern. Die erhaltenen Werte können mit Matlab ausgewertet werden.

Damit die Energiestrategie auf seine Funktion getestet werden kann, wurden die Messungen mittels den Datenblättern von zwei Aufzügen getestet. Die Werte stammen von Aufzügen, welche in Betrieb sind. Nur der Wirkungsgrad wurde angenommen, da er nicht bekannt war.

Da man lange Probleme mit dem Echtzeitsimulator hatte, konnte die Validierung einer schwachen Stromquelle (z.B. eine Photovoltaikanlage) nicht überprüft werden.

Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit sind folgende:

- Es hat sich herausgestellt, dass die Serienschaltung keine Lösung darstellt.
- Die Parallelschaltung eignet sich hingegen für die Energiespeicherung.
- Die Energiespeicherung lohnt sich, da die Leistungsspitzen vom Stromnetz reduziert werden können. Das eine Reduzierung der Leistungsspitzen möglich ist, hat sich mit den Messungen herausgestellt.
- Damit die Schaltung für einen realen Aufzug implementiert werden kann, muss aber die Energiestrategie noch optimiert werden.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ersatzschaltbild des Gleichrichters .....	6
Abbildung 2: Ersatzschaltbild eines Gleichstrommotor .....	7
Abbildung 3: Ersatzschaltbild der Treibscheibe .....	9
Abbildung 4: Ersatzschaltbild des Bremswiderstands.....	9
Abbildung 5: Blockschaltbild des Aufzugs .....	10
Abbildung 6: Blockdiagramm des Bremswiderstands.....	11
Abbildung 7: ideales Fahrprofil .....	12
Abbildung 8: Geschwindigkeitsprofil mit einer lookup Tabelle .....	13
Abbildung 9: Ersatzschaltbild des Wirkungsgrades.....	14
Abbildung 10: Modell Simulink .....	15
Abbildung 11: Matlab plot mit 80 Fahrten.....	16
Abbildung 12: Spitzenleistungen anhand des Wirkungsgrads .....	17
Abbildung 13: Energiebilanz mit verschiedenen Wirkungsgraden .....	17
Abbildung 14: Fahrzyklen einer Woche in einem Mehrfamilienhaus .....	18
Abbildung 15: Leistung des Motors am Montag .....	19
Abbildung 16: ideales Geschwindigkeitsprofil .....	19
Abbildung 17: Gemessenes Geschwindigkeitsprofil .....	20
Abbildung 18: Quelle (Michael Sterner, Ingo Stadler. Energiespeicher, Technologie, Integration. Regensburg, Köln 2017.2.Korrigierte und ergänzte Auflage, Seite 654).....	21
Abbildung 19: Energieflüsse zwischen den verschiedenen Akteuren .....	22
Abbildung 20: Quelle (Michael Sterner, Ingo Stadler. Energiespeicher, Technologie, Integration. Regensburg, Köln 2017.2.Korrigierte und ergänzte Auflage, Seite 665).....	25
Abbildung 21: Schematischer Aufbau einer realen Batterie.....	26
Abbildung 22: Batterie Entladekurve mit Typhoon HIL.....	27
Abbildung 23: Batterie Entladekurve mit Matlab .....	27
Abbildung 24: Energiespeicherung [Aufzug Nr.1] .....	29
Abbildung 25: Leistung für die Energiespeicherung [Aufzug Nr.1] .....	30
Abbildung 26: Energiespeicherung [Aufzug Nr.2] .....	31
Abbildung 27: Leistung für die Energiespeicherung [Aufzug 2] .....	32
Abbildung 28: Ersatzschaltbild des ESS auf dem Gleichspannungsbus.....	33
Abbildung 29: Blockdiagramm des ESS auf dem Gleichspannungsbus.....	34
Abbildung 30:Blockdiagramm des ESS .....	35
Abbildung 31: Strategie ESS .....	36
Abbildung 32: Messungen des Motors .....	36
Abbildung 33: Superkondensator mit 1 Farad [Aufzug Nr.2] .....	37
Abbildung 34: Gleichspannungsbus .....	37
Abbildung 35: Ersatzschaltbild des Energiespeichers parallel auf dem Gleichspannungsbus .....	39
Abbildung 36: Blockdiagramm des Energiespeichers parallel auf dem Gleichspannungsbus .....	40
Abbildung 37: Blockdiagramm des Kondensators.....	41
Abbildung 39: [ Aufzug Nr.1] .....	42
Abbildung 40: Leistungskurven mit dem Superkondensator als Energiespeicher [Aufzug Nr.1] .....	43

Abbildung 41: Spannungsverlauf des Superkondensators.....	43
Abbildung 42: [Aufzug Nr.2] .....	44
Abbildung 43: Leistungskurven mit dem Superkondensator als Energiespeicher [Aufzug Nr.2] .....	44
Abbildung 44: Spannungsverlauf des Superkondensators.....	45
Abbildung 45: Typhoon HIL Stromnetz .....	46
Abbildung 46: Verluste im Wandler .....	46
Abbildung 47: Regler für den Motorstrom.....	47
Abbildung 48: Geschwindigkeitsregelung des Antriebs .....	47
Abbildung 49: Leistungsmessung .....	48
Abbildung 50: Leistungsverlauf mit dem Superkondensator als Energiespeicher [Aufzug Nr.1] .....	51
Abbildung 51: Leistungsverlauf mit dem Superkondensator als Energiespeicher [Aufzug Nr.2] .....	52
Abbildung 53: Messungen der Fahrzyklen mit dem Superkondensator [Aufzug Nr.2] .....	52
Abbildung 54: Messungen mit dem Superkondensator [Aufzug Nr.1] .....	53

## 9 Literatur

- [1] Alfred Rufer, P. B. (2002). *A Supercapacitor-Based Energy-Storage System for Elevators With Soft Commutated Interface*.
- [2] Bilbao, E. (2013). *Energy Management Strategies Based on Dynamic Programming for Applications with Energy Storage Capacity*.
- [3] Chevallier, S. (2020, 2 16). Réseaux et Systèmes d'entraînements.
- [4] Endika Bilbao, P. B.-O. (2014). *Optimal Energy Management Strategy of an Improved Elevator With Energy Storage Capacity Based on Dynamic Programming*.
- [5] Michael Sterner, I. S. (2017). *Energiespeicher, Technologie, Integration*. Regensburg, . Köln .
- [6] Moghaddam, F. (September 2010). *SI-MCR2*.
- [7] P.Barrade. (2019). *EMR and inversion-based control of an elevator system*. Sion.
- [8] Typhoon HIL. (n.d.). <https://www.typhoon-hil.com/de/>.
- [9] Walter Lhomme, P. D. (2014). *La Rem, formalisme multiphysique de commande de systèmes énergétiques*.
- [10] Ziehl-Abegg. (n.d.). <https://www.ziehl-abegg.com/de/de/produktwelten/antriebstechnik/aufzugsmotoren/>. Retrieved from <https://www.ziehl-abegg.com/de/de/produktwelten/antriebstechnik/aufzugsmotoren/>

## 10 Unterschrift

Cina Nils

