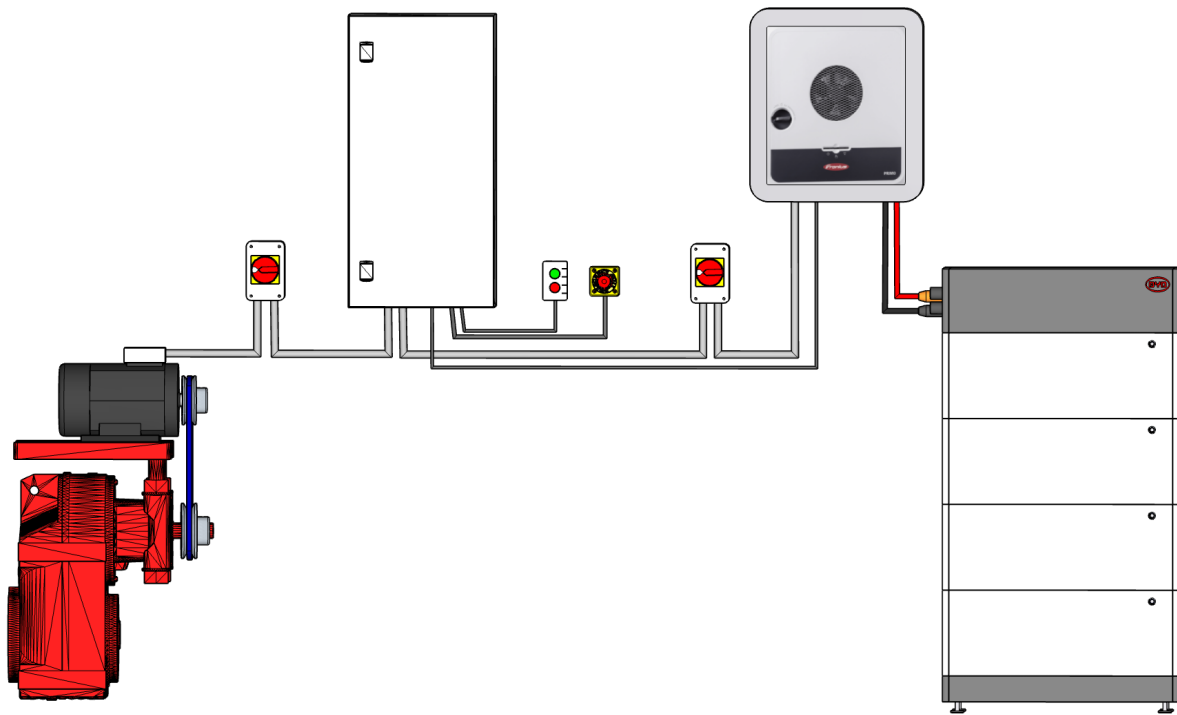


Stromgeneratorsystem für Wasserrad

Dokumentation



FHNW, Hochschule für Technik, Brugg
Projekt 5 EIT

Julian Städeli

Version 3.1
19.01.2024

Abstract

Der Verein Kultur am Mühlebach Böttstein (v-kmb) hat sich dem Ziel gewidmet, das grösste oberflächige Wasserrad Europas zu erneuern. Dieses Projekt, betreut von der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), zielt darauf ab, ein effizientes Strom-Generatorsystem (SGS) zu entwickeln, welches die mechanische Leistung des Wasserrads in elektrische Energie umwandelt. Dieses Projekt wird im Rahmen der Projektarbeit des Studiengangs EIT durchgeführt und ist in zwei Phasen unterteilt: Der hier dokumentierte erste Teil konzentriert sich auf die theoretische Entwicklung und Planung des SGS. Der zweite Teil des Projekts, welcher auf dieser Arbeit aufbaut, wird sich auf die praktische Umsetzung und Realisierung des SGS konzentrieren. Dieses Projekt umfasst die Entwicklung eines Funktionskonzepts für das SGS sowie die Identifizierung und Berechnung der erforderlichen Komponenten. Ein besonderer Fokus der Projektierung liegt auf der Implementierung eines Synchrongenerators und eines Solar-Inverters. Diese Dokumentation beinhaltet theoretische Berechnungen der Eigenschaften des Wasserrads, die Entwicklung von Lösungsansätzen für das Funktionsprinzip des SGS, die Feinplanung des Systems, die Bestimmung der benötigten Komponenten sowie die Entwicklung der Schaltlogik des SGS. Die Nenn-Arbeitsleistung des SGS wird auf 2.5kW gelegt. Mit der Präsentation des finalen Aufbaus endet die theoretische Arbeit des Projekts. Abschliessend wird das Projektergebnis mit den Anforderungen des v-kmb verglichen, gefolgt von einem Ausblick in das Folgeprojekt.

Versionsverlauf

Version	Datum	Autor(en)	Änderungen
1.0	18.11.2023	JS	Dokument erstellt, Layout, Disposition
1.1	21.11.2023	JS	Berechnungen
1.2	27.11.2023	JS	Feinplanung
1.3	29.11.2023	JS	Dimensionierung
1.4	01.12.2023	JS	Schalt- und Regelungstechnik
1.5	03.12.2023	JS	Aufbau
2.0	09.12.2023	JS	Alle bestehenden Kapitel erweitert, Lösungsansätze eingefügt, Validierung
2.1	29.12.2023	JS	Revision nach Feedback durch Dozenten
3.0	30.12.2023	JS	Erste Fertigstellung des Dokuments mit Einleitung und Schluss
3.1	19.01.2024	JS	Abschliessende Anpassungen

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung	Erklärung
v-kmb	Verein Kultur am Mühlebach Böttstein	Auftraggeber des Projekts
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz	Auftragnehmer des Projekts
JS	Julian Städeli	Autor des Dokuments und Auftragnehmer
SGS	Strom-Generatorsystem	Das Projekt selbst
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	Form eines Logikcontrollers, der in der Industrie häufig Anwendung findet
AC	Alternating current	Wechselspannung
DC	Direct current	Gleichspannung
PV	Photovoltaik	Gewinnung von elektrischer Energie durch Sonneneinstrahlung
EVO	Eigenverbrauchsoptimierung	Relevanter Parameter bei der Energieberechnung
MPP	Maximum Power Point	Arbeitspunkt eines Systems mit maximaler Leistung.
HMI	Human Machine Interface	Benutzeroberfläche, menschliche Ansteuerung der Maschine

Tabelle 2: Abkürzungen

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Berechnung der Nenndaten	2
2.1	Drehmoment	2
2.2	Leistung	4
2.3	Bestimmung der Betriebsdrehzahl	5
3	Lösungsansätze	6
3.1	Konzept des Systems	6
3.2	Komponenten	8
3.3	Energiespeicher	11
3.4	Entscheidung	13
4	Feinplanung	14
4.1	Konzept	14
4.2	Sicherheitskonzept	15
4.3	Dimensionierung	16
4.4	Wahl der Komponenten	20
5	Schalt- und Regelungstechnik	21
5.1	Betriebsmodi	21
5.2	Schalt-Technik	22
5.3	Regelsystem	23
6	Aufbau und Montage des Systems	25
6.1	Komponentenliste	25
6.2	Nahtstellen	27
6.3	Montage des Systems	28
7	Abschluss	30
7.1	Validierung	30
7.2	Vergleich zur Projektvereinbarung	30
7.3	Rückblick	32
7.4	Ausblick	32
7.5	Schlusswort	32
A	Anhang	33

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kennlinie über den maximalen Füllgrad der Schaufeln.	2
2.2	Berechnung des effektiven Drehmoments	3
2.3	Drehmomentkennlinie des Wasserrads in Abhängigkeit der Zuflussmenge und der Drehzahl	4
2.4	Leistungskennlinie des Wasserrads in Abhängigkeit der Zuflussmenge und der Drehzahl	5
3.1	Grundkonzept des Generatorsystems	6
3.2	Konzept 1, permanenterregter Synchrongenerator	7
3.3	Konzept 2, Asynchrongenerator	8
3.4	Einfaches Zahnrad	9
3.5	Generator mit Getriebe <i>Quelle: [Alfred Imhof AG]</i>	9
3.6	Links: Frei stehendes Getriebe <i>Quelle: [Alfred Imhof AG]</i> Rechts: Riementrieb	9
3.7	Schema und Ausgangsspannung eines Brückengleichrichters	11
3.8	Vergleich der Komponenten	13
4.1	Mechanisches Grundkonzept mit optionalem Riementrieb	14
4.2	Elektrisches Konzept, mit optionalem DC-Steller	14
4.3	Erweitertes Blockschaltbild des Konzepts mit Sicherheitseinrichtungen.	16
4.4	Berechnung der mechanischen Daten der Welle	17
4.5	Simulationsmodell des SGS mit Generator, Gleichrichter und Kapazität des Inverters.	19
4.6	Simulation des Einschaltverhaltens mit Widerständen.	20
5.1	Flussdiagramm der Betriebsmodi	22
5.2	Grobe Schaltung des SGS	22
5.3	Einschaltlogik des SGS.	23
5.4	Flussdiagramm des geregelten Dauerbetriebs	24
6.1	Mechanischer Aufbau des SGS	25
6.2	Kostenplan elektrotechnische Komponenten des SGS	27
6.3	Finaler Aufbau des SGS. Qualitativ in einer CAD-Software gezeichnet.	29

Tabellenverzeichnis

2	Abkürzungen	
4.1	Mechanische Nenndaten der Welle	16
4.2	Anforderungen an den Generator	18
4.3	Nenndaten des PM-Synchrongenerators	18
6.1	Komponenten der SGK	26
6.2	Restliche Komponenten für die elektrische Installation	26
A.1	Dokumente des v-kmb	33
A.2	Anhang	33

1 Einleitung

Der *Verein Kultur am Mühlebach Böttstein (v-kmb)* hat sich der Aufgabe angenommen, das grösste oberflächliche Wasserrad Europas zu erneuern. Dazu wird das aus Holz bestehende Wasserrad neu angefertigt und mit einem Zahnkranz ausgestattet. Wie sein Vorgänger wird der Zahnkranz über ein Zahnrad eine Welle antreiben. In dieser Projektarbeit soll ein Strom-Generatorsystem (SGS) entwickelt werden, welches aus der mechanischen Leistung der Welle elektrische Energie erzeugt.

Der *v-kmb* beauftragt die *FHNW* für die Entwicklung des SGS. Dabei ist die Idee, dass jeweils ein Semester für die Entwicklung und Umsetzung vorgesehen ist. Diese Dokumentation umfasst das erste Semester der Projektarbeit im Rahmen des Projekt 5 des Studiengangs EIT.

Ziel dieser Projektarbeit ist es, ein Funktionskonzept des SGS zu entwickeln und die dafür benötigten Komponenten ausfindig zu machen und zu berechnen. Die erarbeiteten Überlegungen werden in diesem Dokument beschrieben. Mithilfe dieses Dokuments soll die Realisierung des SGS möglich gemacht werden.

Um die Rahmenbedingungen des Projekts zu klären, wurde eine Projektvereinbarung [1] erstellt. Diese dient als Grundlage für dieses Dokument. Im Verlauf des Projekts wurden regelmässig Meetings gehalten, in welchen der aktuelle Projektfortschritt sowie Vorgehensweisen diskutiert und beschlossen wurden. Des Weiteren sind relevante Änderungen in der Projektentwicklung beschrieben.

Diese Dokumentation ist chronologisch aufgebaut.

Eine theoretische Berechnung der Eigenschaften des Wasserrads ist notwendig, da das neue Wasserrad parallel zu dieser Projektarbeit gebaut wird und somit keine realen Messwerte vorhanden sind.

Zeitgleich werden Lösungsansätze für das Funktionsprinzip erarbeitet. Dies enthält auch die verschiedenen Komponenten, die massgebend zum Aufbau des SGS beitragen.

Mit der Festlegung des Lösungsansatzes kann dessen Feinplanung ausgeführt werden. Dabei werden die benötigten Komponenten identifiziert und auf die Eigenschaften der Welle abgestimmt.

Des Weiteren wird die Schaltlogik des SGS entwickelt und dokumentiert. Dadurch sind Funktion und Betriebsmodi des SGS definiert und dient als Grundlage für die Realisierung.

Zum Abschluss der Projektierung und als Überleitung zur Realisierung wird der finale Aufbau des SGS zusammengefasst. Dies dient als Grundlage für die Montage des Systems.

Im Rahmen der Validierung wird die geleistete Arbeit auf die Anforderungen des Lastenhefts des *v-kmb* geprüft. Zum Schluss wird der Projektfortschritt zusammengefasst und Anforderungen an das Folgeprojekt gestellt.

2 Berechnung der Nenndaten

Die zentrale Aufgabe des SGS besteht darin, mechanische in elektrische Leistung zu konvertieren. Deshalb ist es relevant, die mechanischen Beziehungen des Systems zu verstehen. Weil die mechanischen Eigenschaften des SGS durch das Wasserrad bestimmt werden, ist eine Berechnung der mechanischen Größen des Wasserrads notwendig. Durch die Bestimmung des Drehmoments und der Drehzahl des Wasserrads in Abhängigkeit des Zuflusses, sind die mechanischen Eingangsdaten des SGS bestimmt.

Die für Berechnungen verwendete Formeln und Beziehungen wurde aus physischen und digitalen Fachbüchern sowie aus Studienunterlagen herausgesucht.

2.1 Drehmoment

Das Drehmoment des Wasserrads hängt primär von der Zuflussmenge sowie der Drehzahl ab. Dabei hängt die Drehzahl des Wasserrads von Faktoren wie Wasserzuflussmenge, genutzte Leistung (Bremsleistung) und Reibungsverluste (Verlustleistung) ab.

Für die nachfolgenden Berechnungen werden der Zufluss und die Drehzahl als Bereich interpretiert. Somit wird kein numerischer Wert angegeben.

Folgende Parameter sind gegeben:

1. Durchmesser $d = 9.64\text{m}$ bzw. Radius $r = 4.82\text{m}$
2. Totale Anzahl Schaufeln = 84
3. Kennlinie über den maximalen Füllgrad der Schaufeln, Abbildung 2.1. Das Volumen jeder Schaufel beträgt 36 Liter Wasser. Bei maximalem Füllgrad der Schaufeln sind 36 der 84 Schaufeln befüllt. Die Kennlinie wurde vom *v-kmb* bereitgestellt [0.3].

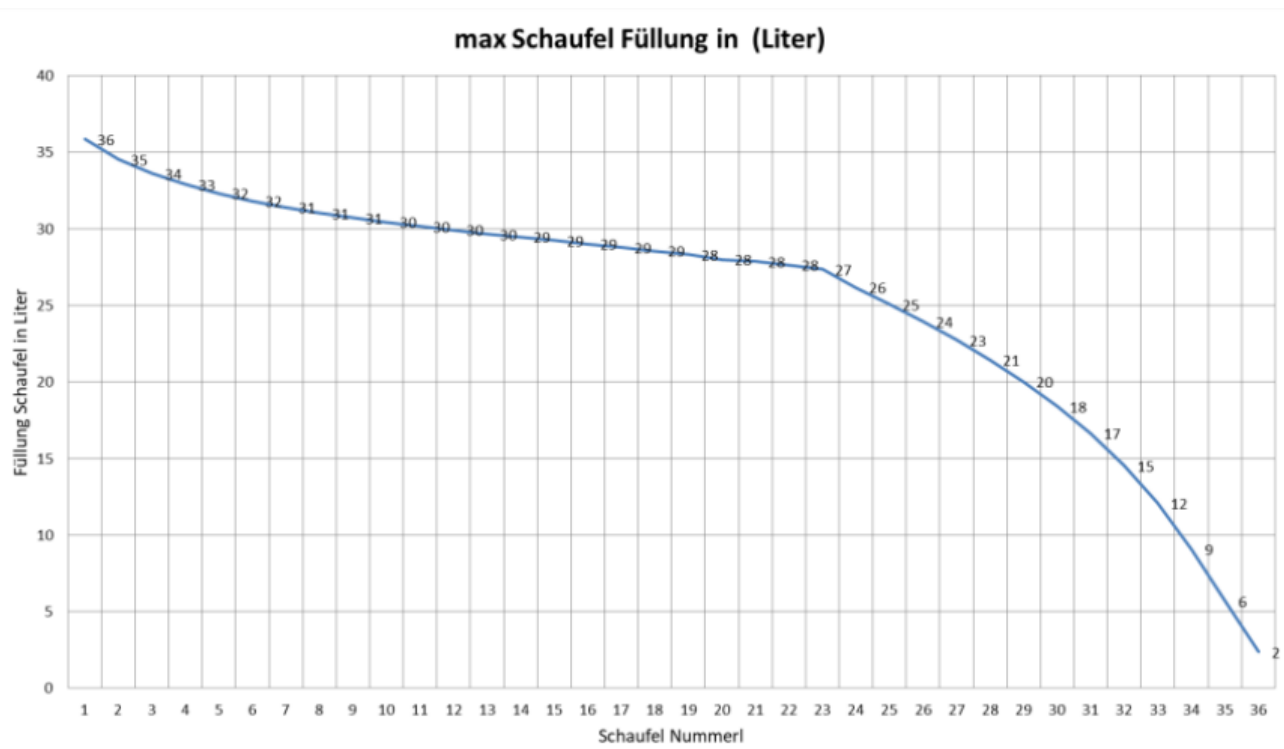


Abbildung 2.1: Kennlinie über den maximalen Füllgrad der Schaufeln.

Um die Abhängigkeit der Zuflussmenge und der Drehzahl einbeziehen zu können, sind die nachfolgenden Berechnungen notwendig.

Die Länge einer Schaufel am Wasserrad beträgt:

$$l_s = \frac{\text{Umfang des Wasserrads}}{\text{Anzahl Schaufeln}} = \frac{9.64\text{m} \cdot \pi}{84} = 36.1\text{cm} \quad (2.1)$$

Die Drehzahl des Wasserrads wird in Umdrehung pro Sekunde umgerechnet:

$$n_{\text{Rad}} = \frac{N_{\text{Rad}}}{60} \quad (2.2)$$

Nun kann die Winkelgeschwindigkeit in m/s berechnet werden:

$$v_{\text{Rad}} = \text{Umfang} \cdot \text{Drehzahl} = 9.64\text{m} \cdot \pi \cdot n_{\text{Rad}} \quad (2.3)$$

Daraus lässt sich die Füllzeit einer Schaufel berechnen. Diese sagt aus, wie lange eine Schaufel unter dem Wasserstrahl ist:

$$t_s = \frac{\text{Länge der Schaufel}}{\text{Winkelgeschwindigkeit}} = \frac{l_s}{v_{\text{Rad}}} \quad (2.4)$$

Schliesslich kann der effektive Füllgrad der Schaufel in Abhängigkeit der Zuflussmenge (l/s) bestimmt werden:

$$V_s = \text{Zuflussmenge} \cdot \text{Zeit pro Schaufel} = Q \cdot t_s \quad (2.5)$$

Somit ist die Gravitationskraft einer Schaufel bestimmt:

$$F = \text{Anzahl Liter Wasser} \cdot \text{Gravitationskonstante} = V_s \cdot 9.81 \frac{\text{N}}{\text{M}} \quad (2.6)$$

Grundsätzlich ist das Drehmoment als Kraft mal Hebelarm definiert. Da das Wasserrad aus vielen einzelnen und unterschiedlich befüllten Schaufeln besteht, ist das effektive Drehmoment des Wasserrads iterativ für jede Schaufel zu rechnen. Aus den gegebenen Daten kann der Schaufel-Zwischenwinkel berechnet werden:

$$\phi_s = \frac{360^\circ}{84 \text{ Schaufeln}} = 4.29^\circ \quad (2.7)$$

Somit kann der Winkel für jede Schaufel bei der Drehmomentberechnung berücksichtigt werden. Das effektive Drehmoment setzt sich zusammen aus dem Radius des Rads, der Gravitationskraft des Wassers in jeder Schaufel und dem Hilfswinkel α , wobei $\alpha = \frac{\pi}{2} - \phi$

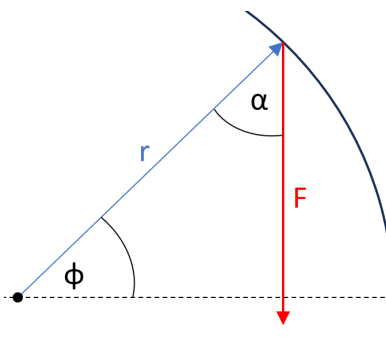


Abbildung 2.2: Berechnung des effektiven Drehmoments

Das Drehmoment in Abhängigkeit des Hilfswinkels kann nun wie folgt berechnet werden:

$$M(\alpha) = F \cdot r \cdot \sin(\alpha) \quad (2.8)$$

Nun kann für alle 36 teil-befüllten Schaufeln das Drehmoment bezüglich der Drehachse bestimmt werden. Die Summe ergibt das totale anliegende Drehmoment. Bei maximalem Füllgrad, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, liegt ein statisches Drehmoment von **29'450 Nm** an.

Um die dynamische Abhängigkeit des Drehmoments von der Drehzahl und des Zuflusses zu visualisieren, wurde die oben beschriebenen Berechnungen mit Matlab [2] durchgeführt und geplottet. Dabei wird die maximale Füllung von 36 Litern pro Schaufel berücksichtigt. Sollte die oberste Schaufel nun weniger als 36 Liter beinhalten, wird die Kennlinie aus Abbildung 2.1 entsprechend abgeschnitten. Somit entsteht die folgende Drehmomentkennlinie:

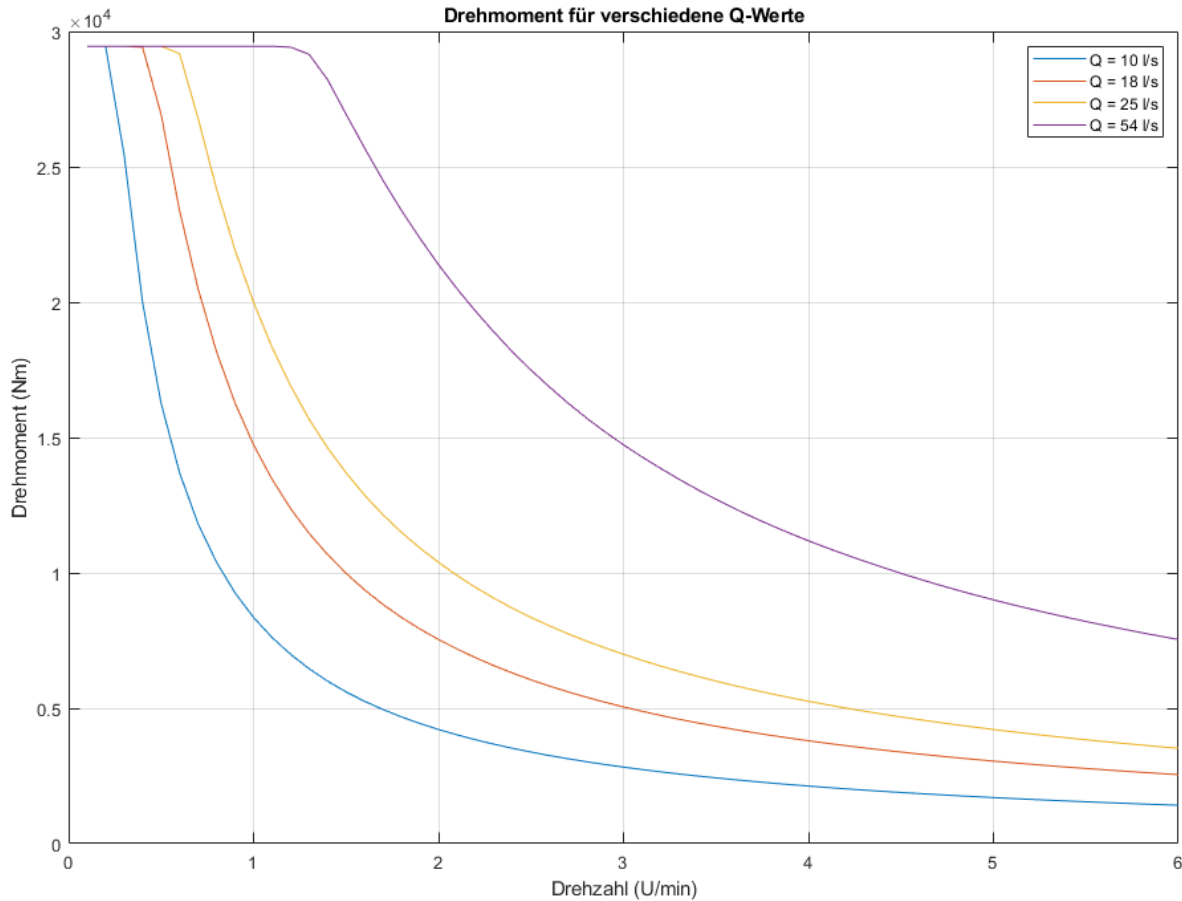


Abbildung 2.3: Drehmomentkennlinie des Wasserrads in Abhängigkeit der Zufussmenge und der Drehzahl

2.2 Leistung

Grundsätzlich ist die mechanische Leistung des Wasserrads definiert durch:

$$P_{\text{mech}} = \omega_{\text{Rad}} \cdot M_{\text{Rad}} \quad (2.9)$$

Wobei ω_{Rad} die Winkelgeschwindigkeit und M_{Rad} das Drehmoment des Wasserrads bezeichnet. Dabei erfolgt die Konvertierung der Drehzahl von Umdrehungen pro Minute (N) zur Winkelgeschwindigkeit (ω) wie folgt:

$$\omega = \frac{N \cdot 2\pi}{60} \quad (2.10)$$

Somit kann die mechanische Leistung in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment aufgezeichnet werden.

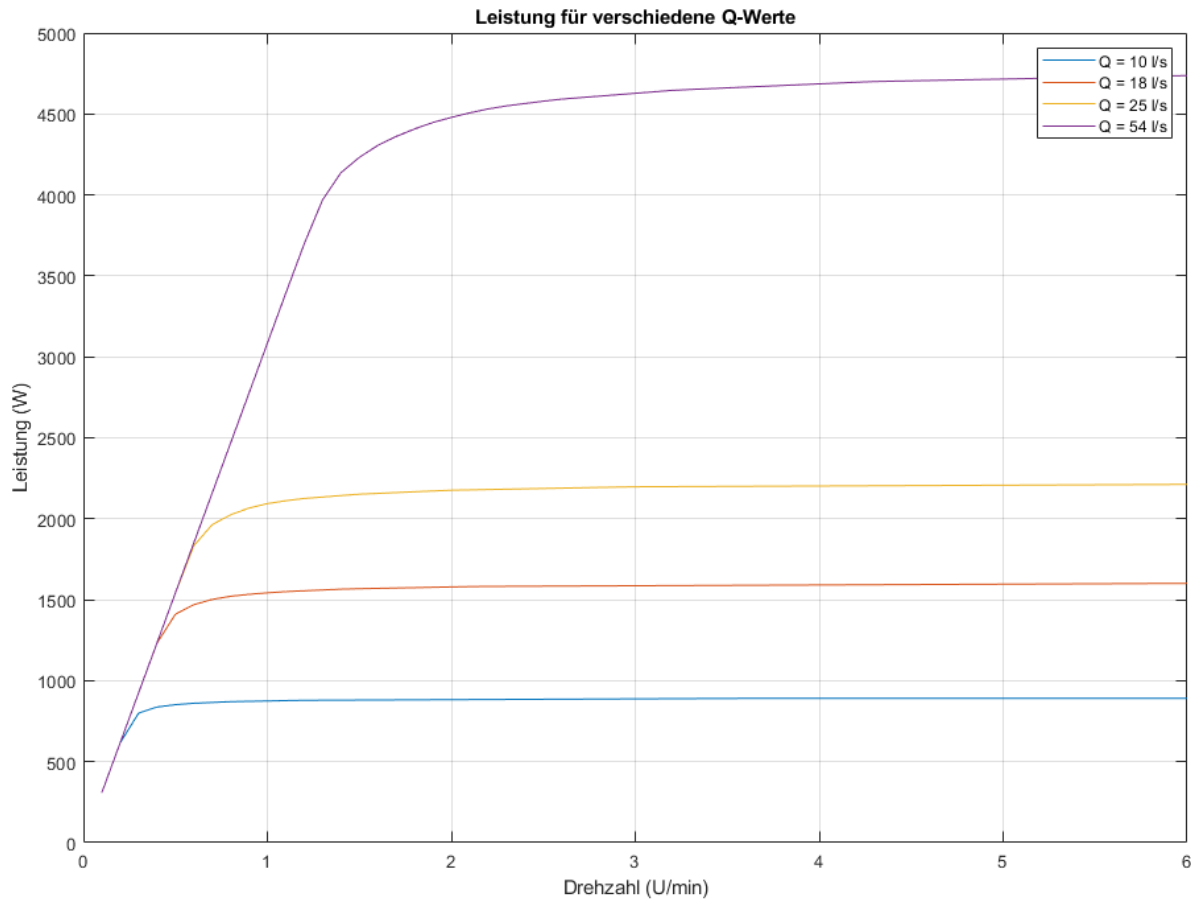


Abbildung 2.4: Leistungskennlinie des Wasserrads in Abhängigkeit der Zuflussmenge und der Drehzahl

Wie in Abbildung 2.4 ersichtlich, kompensiert die steigende Drehzahl das abfallende Drehmoment, somit bleibt die Leistung ab einer gewissen Drehzahl konstant. Dies entspricht der Leistung des Zuflusses. Durch die durchgeführten Berechnungen wird ersichtlich, dass die Leistung des SGS stark vom Zufluss abhängt.

2.3 Bestimmung der Betriebsdrehzahl

Anhand der Abbildung 2.4 könnte man darauf schliessen, dass die Drehzahl frei gewählt werden kann. Allerdings werden in den Berechnungen die Verlustleistungen nicht berücksichtigt. Diese werden mit steigender Drehzahl ebenfalls grösser.

Das neue Wasserrad soll gleichermassen betrieben werden wie das vorgängige. Dazu wurde das [Video der Mühle (1960)] analysiert. In einer Szene ist eine Viertelumdrehung zu beobachten, welche ca. 2,8 Sekunden dauert. Somit kann die Drehzahl bestimmt werden:

$$\frac{2.8s}{0.25U} = 11.2 \frac{s}{U} \rightarrow \frac{60s \cdot U}{11.2s \cdot \text{min}} = 5.35 \frac{U}{\text{min}} \quad (2.11)$$

3 Lösungsansätze

Es gibt mehrere Varianten, wie das SGS aufgebaut werden kann. Deshalb muss ein Lösungsansatz gewählt werden, bevor mit der Projektierung des SGS angefangen werden kann. In diesem Kapitel werden Konzepte und Varianten von Komponenten beschrieben, mit welchen das SGS aufgebaut werden kann. Dafür wurde eine fachliche Recherche betrieben. Der Grossteil des Inhalts dieses Kapitels wurde im Rahmen des Vorprojekts als separates Dokument erstellt und mit dem Auftraggeber besprochen.

3.1 Konzept des Systems

Grundkonzept

Das Grundkonzept beschreibt den grundlegenden technischen Aufbau und stellt die Basis für das SGS dar. Die Abbildung 3.1 zeigt das Grundkonzept, wobei die farbigen Pfeile den Leistungsfluss darstellen.

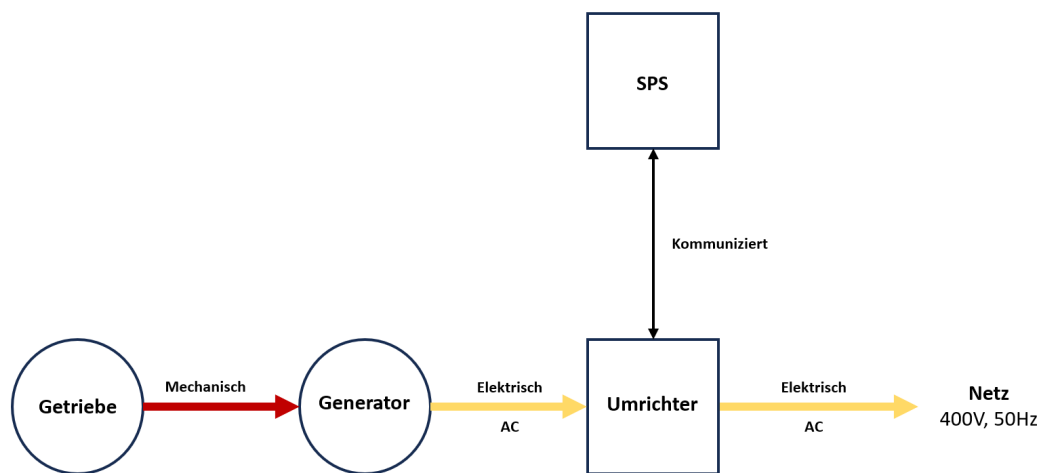


Abbildung 3.1: Grundkonzept des Generatorsystems

In diesem Abschnitt werden zwei Grundkonzepte vorgestellt. Sie unterscheiden sich in der elektrotechnischen Überlegung und somit in den Komponenten. Folgende Komponenten werden in beiden Systemen verwendet.

- **Getriebe:**
Wandelt die Drehzahl der Welle in den Nennbereich des Generators um.
- **Generator:**
Wandelt mechanische in elektrische Energie um.
- **Umrichter**
Wandelt die elektrische Energie des Generators entsprechend den Anforderungen des elektrischen Netzes um.
- **Speicherprogrammierbare Steuerung**
Steuert und regelt das System anhand von Messungen und Parametrierungen.

3.1.1 Konzept 1

Komponenten

- Synchrongenerator
- Gleichrichter
- Wechselrichter

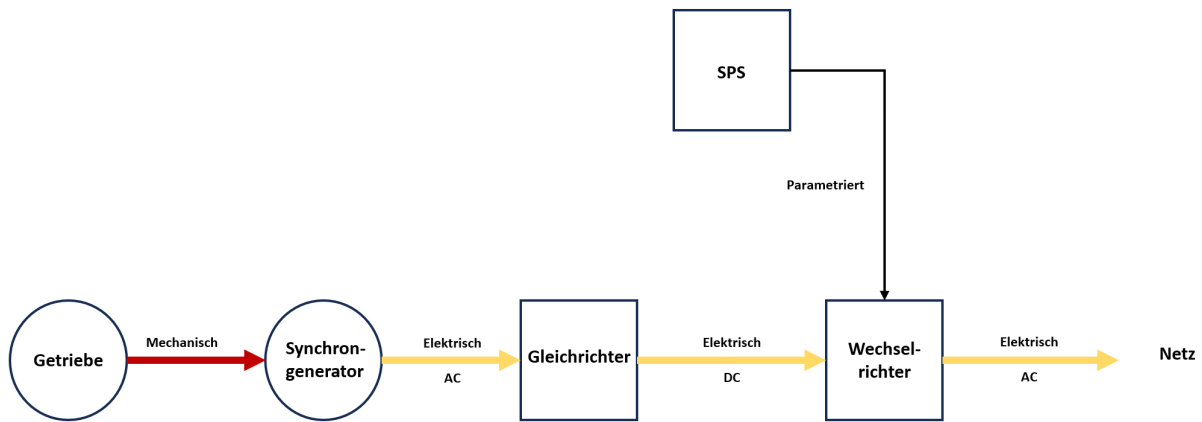


Abbildung 3.2: Konzept 1, permanenterregter Synchrongenerator

Funktion

Das Drehstromsystem des Synchrongenerators wird in einem Gleichstromzwischenkreis gleichgerichtet. Der Wechselrichter überträgt die Leistung anschliessend ins Netz. Dabei parametrieren eine SPS den Wechselrichter, um eine optimale Leistung zu erzielen.

3.1.2 Konzept 2

Komponenten

- Asynchrongenerator
- Frequenzumrichter

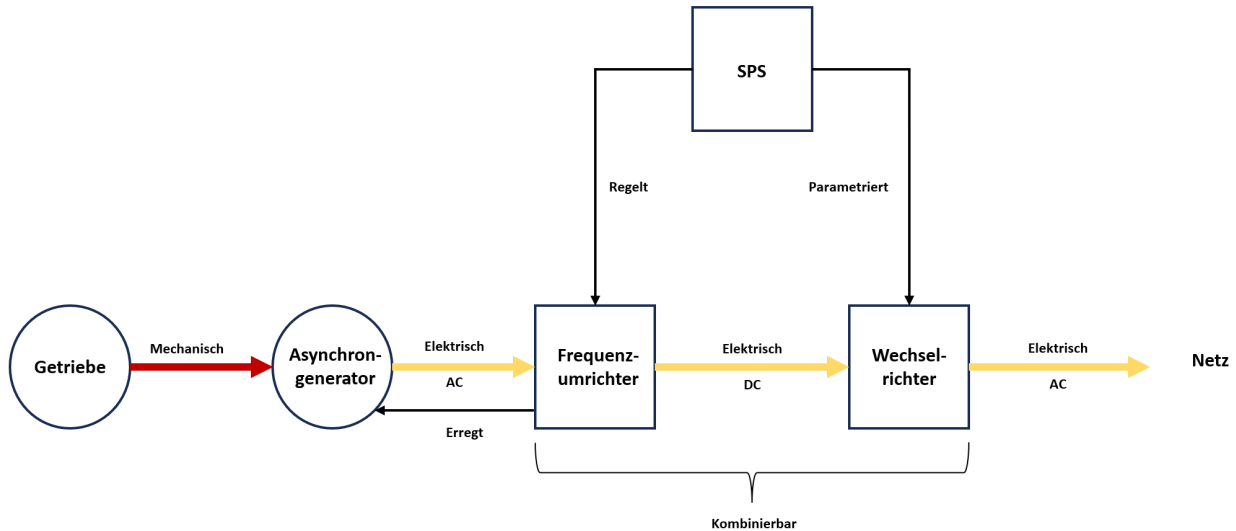


Abbildung 3.3: Konzept 2, Asynchrongenerator

Funktion

Die SPS regelt den Frequenzumrichter anhand der Drehzahl der Welle des Asynchrongenerators. Durch den entstehenden Schlupf wird die mechanische in elektrische Leistung übertragen, welche der Frequenzumrichter in den Gleichstromzwischenkreis überträgt. Schlussendlich wird die elektrische Leistung durch einen Wechselrichter ins Netz übertragen. Einige Frequenzumrichter beinhalten einen Zwischenkreis und Wechselrichter.

3.2 Komponenten

In diesem Abschnitt werden die Komponenten beider Lösungskonzepte erläutert. Dieser Abschnitt dient ebenfalls der Erklärung der theoretischen Grundlagen. Die in diesem Projekt schlussendlich eingesetzten Komponenten werden deshalb genauer erläutert.

3.2.1 Getriebe

Durch das Getriebe wird die Drehzahl der Welle auf den Nenndrehzahlbereich des Generators übersetzt. Für beide Lösungskonzepte ist eine Form von Getriebe notwendig. Dabei gibt es verschiedene Ausführungen.

Einfaches Zahnrad

Die einfachste Lösung für die Übersetzung wäre das Anbringen eines kleinen Zahnrad an der Generatorwelle. Dieses würde vom grossen Mahlgetriebe angetrieben werden. Die Realisierung einer solchen Anordnung ist nur bedingt zu empfehlen, da das Zahnrad hohen mechanischen Belastungen standhalten muss. Ausserdem ist die Schmierung eines solchen Getriebes nicht wartungsfreundlich.

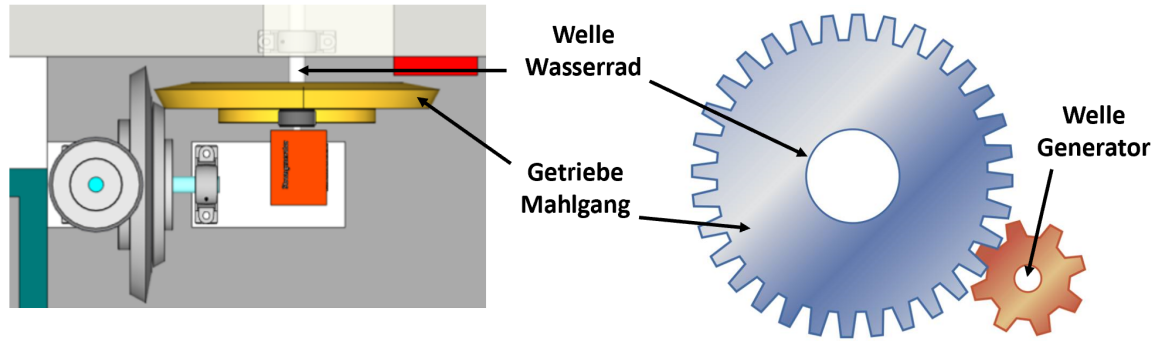


Abbildung 3.4: Einfaches Zahnrad

Generator mit Getriebe

Auf dem Markt gibt es diverse Generatoren, die ein fertiges Getriebe an der Generatorwelle haben. Dadurch ergibt sich eine längliche, aber kompakte Bauform des Systems. Je nach erforderlichem Generator-Typ ist eine passende Kombination aufgrund des begrenzten Angebots eher unwahrscheinlich.



Abbildung 3.5: Generator mit Getriebe | *Quelle: [Alfred Imhof AG]*

Separates Getriebe

Ein separates, frei stehendes Getriebe könnte an die Welle des Wasserrads montiert werden. Auf dessen Ausgangswelle kann die Generatorwelle angebracht werden. Je nach verfügbarem Übersetzungsverhältnis könnte zwischen dem Getriebe und dem Generator ein zusätzlicher Riementrieb montiert werden. Dadurch können die Komponenten besser aufeinander abgestimmt werden.



Abbildung 3.6: Links: Frei stehendes Getriebe | *Quelle: [Alfred Imhof AG]* Rechts: Riementrieb

3.2.2 Generator

Asynchrongenerator

Asynchronmaschinen können sowohl im Motor- wie im Generatorbetrieb verwendet werden. Damit sie als Generator funktionieren, muss die Synchrondrehzahl am Stator vorgegeben werden und der Rotor muss schneller als die Synchrondrehzahl drehen. Dabei ist der Schlupf der relevante Parameter für die Generatorleistung und -effizienz.

Asynchrongeneratoren könnten ebenfalls direkt ans Netz gekoppelt werden, wobei die Problematik dieselbe wie bei der Synchronmaschine ist. Da nur ein kleiner Schlupf gefahren werden kann, muss die Synchrondrehzahl des Stators präzise geregelt werden. Des Weiteren belasten netzerrigte Asynchrongeneratoren aufgrund ihres Blindleistungsbedarfs das Netz relativ stark. Deshalb werden Asynchronmaschinen meistens mit einem Frequenzumrichter und einem Zwischenkreis betrieben. Damit die Maschine Leistung ins Netz einspeisen kann, wird ein Frequenzumrichter mit Zwischenkreis und ggf. Wechselrichter benötigt.

Synchrongenerator

Synchronmaschinen funktionieren über ein Magnetfeld im Rotor und drehen synchron mit dem Drehfeld. Im Generatorbetrieb wird durch das Magnetfeld im Rotor eine Spannung in den Statorspulen induziert. Die Frequenz und Amplitude der induzierten Spannung hängt dabei von der Rotordrehzahl ab. Der Strom ist proportional zum Drehmoment.

Synchrongeneratoren sind in der Regel effizienter als Asynchrongeneratoren. Dabei ist der permanenterrigte Synchronmotor attraktiv, da dieser nicht eine gleichstromerregte Spule, sondern Magneten verwendet. Dadurch benötigt der Rotor keine eigene Stromversorgung und somit keine Kohlebürsten, was den Generator wartungsfreier macht.

Grundsätzlich können Synchrongeneratoren direkt ans Netz gekoppelt werden, indem die Drehzahl an der Welle genau stimmt. Allerdings bedeuten Schwankungen in der Drehzahl einen instabilen Betrieb der Maschine. Deshalb wird ein gestützter Zwischenkreis mit Wechselrichter benötigt.

3.2.3 Umrichter

Die Art des Umrichters ist vom Systemaufbau abhängig. Ein Umrichter im Allgemeinen richtet eine elektrische Grösse wie die Frequenz oder die Spannung von einer Seite auf die andere um.

Frequenzumrichter

Diese Form von Umrichter findet ihre Anwendung häufig in der Antriebstechnik. Die primäre Funktion des Frequenzumrichters besteht darin, die Frequenz eines Spannungssystems zu wandeln. Es sind Kombinationen mit Gleich- oder Wechselrichtern erhältlich.

Die Drehzahl von elektrischen Maschinen wie Synchron- und Asynchronmotoren ist direkt frequenzabhängig. In der Antriebstechnik werden auf diese Weise Drehzahlen geregelt oder grössere Maschinen langsam hochgefahren. In der Verwendung mit einem Asynchrongenerator gibt der Frequenzumrichter die Synchrondrehzahl des Generators vor. Dadurch kann der Schlupf des Generators bezüglich der Wellendrehzahl im optimalen Bereich gehalten werden.

Gleichrichter

Der Gleichrichter kann eine Wechselspannung (AC) in eine Gleichspannung (DC) konvertieren. Dabei bestimmt die Art des Gleichrichters die Qualität des generierten Gleichstroms. Je nach Anforderung an die Gleichspannung, die z.B. vom Wechselrichter gestellt wird, ist ein bestimmter Gleichrichtertyp zu wählen. Für diese Anwendung kommt in Kombination mit der Synchronmaschine der einfachste der Gleichrichter, der Brückengleichrichter, infrage. Dieser ist lediglich aus Dioden gebaut und ist in dreiphasiger Ausführung erhältlich. Die Abbildung 3.7 zeigt das Schema eines dreiphasigen Brückengleichrichters.

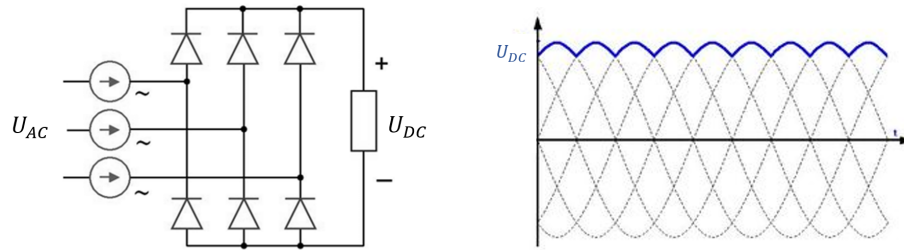


Abbildung 3.7: Schema und Ausgangsspannung eines Brückengleichrichters

Das Ausgangssignal ist dabei eine DC-Spannung mit Ripple. Diese 'unsaubere' Gleichspannung könnte anschliessend mit einem Kondensator geglättet werden. Der Mittelwert der Ausgangsspannung des B6 Brückengleichrichters (sechs Pulse pro Periode) ist von der Eingangsspannung abhängig:

$$\bar{U}_{DC} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot U_{AC,eff} = 1.35 \cdot U_{AC,eff} \quad (3.1)$$

Solar-Inverter

Diese Art von Umrichter stammt aus der Solarbranche, bei der eine DC-Spannung von den Photovoltaik-Panels erzeugt wird. Der Solarumrichter konvertiert diese in eine AC-Spannung und ist somit eine Form von Wechselrichter. Dabei kann der Solarumrichter direkt ins Netz und/oder in einen Batteriekreis einspeisen. Durch die heutige Solarindustrie sind Solarumrichter in unzähligen Varianten erhältlich. Ausserdem sind viele Solarumrichter mit Kommunikationsschnittstellen ausgestattet. Über diese können Daten gelesen oder geschrieben werden.

Durch die beschriebene Topologie der Konzepte mit einem DC-Zwischenkreis verhalten sich beide Konzepte wie Photovoltaik-Panels, bei der die ändernde mechanische Leistung des Wasserrads mit der Verschattung des Panels verglichen werden kann.

Durch den grossen Markt für Solarkomponenten ist die Auswahl an Solar-Invertern gross. Dadurch ist die Verfügbarkeit eines geeigneten Inverters wahrscheinlich. Ebenfalls bewirkt die Popularisierung des Solar-Markts eine gute Anbindung in ein smartes Netzwerk.

Energiespeicher sind in der Solar-Branche sehr gefragt. Falls ein Energiespeicher gewünscht ist, kann ein sogenannter Hybrid-Inverter verwendet werden, welcher ein integriertes Lastmanagement für die lokale Stromversorgung anbietet. Durch dieses entscheidet der Inverter, ob die gewonnene Energie im Haus verbraucht werden kann oder ob sie im Akku gespeichert wird. Dieser Vorgang ist Teil der Eigenverbrauchsoptimierung (EVO). Da Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen) üblich sind, bietet ein Solar-Inverter eine einfache Schnittstelle ans Verteilnetz. Dies ist ein grosser Vorteil für die Bewilligung eines Anschlussgesuchs einer Energie-Erzeugungsanlage.

3.3 Energiespeicher

Durch den Einsatz eines Energiespeichers kann die Anlage bzw. das Haus kontinuierlich mit Strom versorgt werden. Dies ist insbesondere für Anlagen relevant, welche auf Stromausfälle sensibel sind, z.B. Labore oder Datenzentren. Dabei spricht man oft von einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV).

Gerade bei Solaranlagen sind Akkus ebenfalls sehr gefragt, da sie massgebend zur Eigenverbrauchsoptimierung (EVO) beitragen. Die EVO beschreibt, wie viel von der produzierten Energie selbst verwendet wird und wie viel vom Netz zugekauft werden muss. Durch eine abgestimmte EVO können somit Stromkosten eingespart werden. Solaranlagen produzieren bekanntlich nur tagsüber und bei gutem Wetter viel Energie. Eine PV-Anlage mit Akkusystem kann die tagsüber überschüssig produzierte Energie zwischenspeichern und sie am Abend, wenn die PV weniger produziert, wieder abgeben.

Da die Wasserkraft nahezu 24 Stunden am Tag zur Verfügung steht, ist der Einsatz eines Energiespeichers nur bedingt sinnvoll. Wenn das Strom-Generatorsystem den Eigenverbrauch der Überbauung nicht abdecken kann, könnte die in der Nacht überschüssig produzierte Energie gespeichert werden, um sie tagsüber zu verwenden.

3.3.1 Lithium-Akku

Die Speicherung von elektrischer Energie erfolgt heutzutage oftmals über chemische Energiespeicher, wie etwa Batterien und Akkumulatoren. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass Akkumulatoren im Gegensatz zu Batterien wieder aufgeladen werden können.

Zu den verschiedenen Akkutypen gehören etwa Blei- und Lithium-Akkumulatoren, wobei Lithium-basierende Akkus eine deutliche höhere Energiedichte aufweisen und in der modernen Technologie häufig Anwendung finden. Das Laden eines Lithium-Akkus ist durchaus komplex. Deshalb benötigen solche Akkumulatoren ein Batterie-Management-System (BMS).

Die Lebensdauer von Lithium-Akkus ist beschränkt, Batteriehersteller für die Solarindustrie geben i.d.R. eine Garantie von 10 Jahren.

Vorteile

Lithium-Akkus sind eine ausgereifte und weit verbreitete Technologie. Diese Akkumulatoren weisen eine hohe Energiedichte auf und sind deshalb platzsparend. Des Weiteren ist die Anbindung eines Lithium-Speichersystems an einen Solarumrichter oder ans Netz heutzutage einfach und gut erhaltlich.

Nachteile

Akkusysteme sind allgemein ein umstrittenes Thema. Lithium-Akkus in dieser Grösse sind relativ kostspielig und werden oftmals aus Budget-Gründen nicht realisiert. Zusätzlich stellen Lithium-Zellen ein gewisses Sicherheitsrisiko dar, da diese durch einen technischen Defekt brennen können.

3.3.2 Salzatterie

Eine neuere Technologie unter den chemischen Speicher sind Salzatterien. Dabei gibt es zwei wesentliche Typen, den Salzwasserspeicher und die Salzatterie.

Vorteile

Im Gegensatz zu Lithium-Akkumulatoren belasten Salzatterien beim Abbau der Rohstoffe die Umwelt weniger. Ebenfalls sind sie nicht brennbar und können gut recycelt werden.

Nachteile

Salzatterien benötigen aufgrund der geringen Energiedichte viel Platz. Ausserdem sind die Investitionskosten vergleichsweise hoch. Davon abgesehen ist die Technologie noch nicht ausgereift, deshalb ist die Anschaffung einer solchen Batterie gut zu überdenken.

3.3.3 Mechanische Speicher

Elektrische Energie kann nicht nur in Form von Batterien gespeichert werden. In der Schweiz sind die grössten Energiespeicher Stauseen oder Pumpspeicherwerke, in denen Wasser auf ein höher gelegenes Niveau gepumpt wird. Dadurch wird die elektrische Energie in potenzielle (Höhen-) Energie umgewandelt. Dasselbe Prinzip wurde auch mit Betonblöcken getestet. Dort wurden die möglichst schweren Blöcke bei überschüssiger Energie hochgezogen und bei Bedarf wieder heruntergelassen.

Vorteile

Der Wirkungsgrad von mechanischen Speichermethoden ist vergleichsweise hoch, da das genutzte Prinzip der potenziellen Energie simpler ist als die chemischen Prozesse eines Akkumulators.

Nachteile

Der mechanische Aspekt eines Energiespeichers mit Betonblöcken ist ein grosser Nachteil, denn er ist wartungsintensiv. Des Weiteren kann vergleichsweise wenig Energie gespeichert werden. Dies wird anhand der folgenden Beispielrechnung ersichtlich. Dabei wird ein fünf Tonnen schweres Gewicht um fünf Meter angehoben.

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = 5000\text{kg} \cdot 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 5\text{m} = 245'250\text{J} \quad (3.2)$$

$$E_{\text{Speicher}} = \frac{245'250\text{Ws}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \approx 68\text{Wh} \quad (3.3)$$

Zum Vergleich: Ein herkömmlicher E-Bike-Akku speichert etwa 300Wh.

Der Einsatz eines Energiespeichers für dieses Projekt sollte noch auf seine Sinnhaftigkeit geprüft werden. Dabei wären Lithium-Akkus am geeignetsten. Die anderen Energiespeicher erfordern zusätzliche Recherche und Projektierung, was den Rahmen dieses Projekts sprengen würde.

3.4 Entscheidung

Um das Projekt weiterführen zu können, muss eines der beschriebenen Konzepte gewählt werden. Zusätzlich muss die Verfügbarkeit der Komponenten gewährleistet sein. Deshalb ist eine grobe Materialrecherche erforderlich. Das Ergebnis der Recherche fliesst in die Entscheidung ein.

In der Abbildung 3.8 werden die Komponenten auf verschiedene Eigenschaften verglichen, wie die Anschaffungskosten und die Einfachheit der Beschaffung. Dabei ist die Bewertung nur grob abgeschätzt und hängt von der spezifischen Komponente ab.

Vergleich	Gundkonzept		Getriebe			Generator		Umrichter				Speicher			
	Konzept 1	Konzept 2	Zahnrad	kombiniert	separat	Synchron	Asynchron	Kombi FU	FU	Gleich	Wechsel	Solar	Lithium	Salz	Mechanisch
Preis	+	-	++	-	=	-	+	--	-	++	-	+	-	-	=
Beschaffung / Verfügbarkeit	=	+	+	-	+	-	+	--	+	++	+	++	++	--	--
Technische Komplexität	+	=	++	+	+	+	+	++	=	++	+	+	+	=	++
Lebensdauer / Unterhalt	+	-	++	=	=	+	-	=	=	+	=	=	=	+	--
Störungsanfälligkeit	++	=	=	=	=	+	-	-	-	+	=	+	=	=	+
Total Punkte	5	-1	7	-1	2	3	3	-2	-1	8	1	5	2	-2	-1

Abbildung 3.8: Vergleich der Komponenten

Aus folgenden Gründen wurde das **Konzept 1** gewählt: Synchrongeneratoren sind sehr robust und ihr Betrieb ist aufgrund der einfachen Schaltung mit passiven Elementen (B6) weniger anfällig auf Störungen, wie der einer Asynchronmaschine. Der Einsatz eines anschliessenden Diodengleichrichters ist dabei eine simple und solide Möglichkeit, einen Solarumrichter zu betreiben. Dieser empfiehlt sich durch die bereits beschriebenen Eigenschaften. Ein Proof of Concept besteht in Form eines Modells. Die übrigen Komponenten werden im weiteren Projektverlauf geprüft.

4 Feinplanung

Um die Funktion des Lösungsansatzes mit Synchronmaschine, Diodengleichrichter und Solar-Inverter zu gewährleisten, sind eventuell weitere Komponenten und Überlegungen notwendig. Im nächsten Schritt wird das Konzept genauer untersucht, um die zusätzlichen Komponenten festzulegen. Des Weiteren werden die Eigenschaften der Komponenten bestimmt.

4.1 Konzept

Da das SGS in der mechanischen sowie der elektrischen Domäne arbeitet, werden zwei Teilkonzepte beschrieben. Als erster Baustein dieses Konzepts wurde die Verbindung zwischen Mechanik und Elektrotechnik, der Generator, gelegt. Durch seine spezifischen Eigenschaften wie Nenndrehzahl und -spannung werden Teilsysteme wie Getriebe und Gleichrichter notwendig und bestimmt.

4.1.1 Mechanik

Für das SGS wurde im Rahmen dieses Projekts ein mechanisches Grundkonzept entworfen. Für die mechanische Anbindung des SGS könnte eine Art von Kupplung notwendig sein. Um in die Nähe der Synchrodrehzahl des Generators zu gelangen, ist ein Getriebe notwendig. Durch das begrenzte Angebot an Übersetzungsverhältnissen könnte anschliessend ein Riemengetriebe eingesetzt werden. Falls nötig, ermöglicht das Riemengetriebe eine einfache Korrektur des Übersetzungsverhältnisses und dient als mechanische Entkoppelung des Generators.

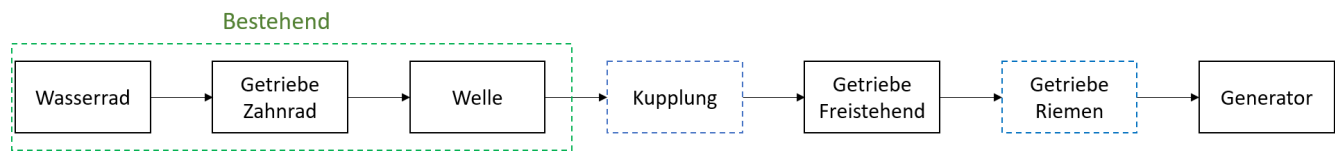


Abbildung 4.1: Mechanisches Grundkonzept mit optionalem Riementrieb

Durch die feinere Recherche und Planung des mechanischen Teilsystems wird klar, dass es von diesem Projekt abgegrenzt werden muss. Die mechanischen Eigenschaften des Wasserrads und die Konstruktion des mechanischen Teilsystems erfordern die Expertise einer Fachkraft aus der Mechanik. Deshalb wird das mechanische Teilsystem nur noch als Grobkonzept weiterentwickelt.

4.1.2 Elektrotechnik

Der Solarinverter erfordert eine DC-Eingangsspannung. Um die AC-Ausgangsspannung des Generators gleichzurichten, wird die B6-Brückenschaltung verwendet. Da der Solarinverter einen durch Kondensatoren gestützten DC-Zwischenkreis besitzt, ist keine zusätzliche Glättung notwendig. Je nach Nenndaten des Solarinverters und des Generators könnte ein DC-Steller die Spannung optimieren.

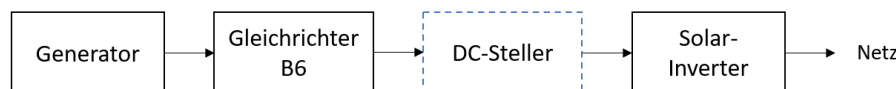


Abbildung 4.2: Elektrisches Konzept, mit optionalem DC-Steller

4.2 Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept sorgt dafür, dass das SGS sicher betrieben werden kann. Durch die folgenden Überlegungen können Komponenten vor Zerstörung geschützt werden. Die Betriebssicherheit der Anlage wird durch die notfallmässige Abschaltung gewährleistet.

Zuflussklappe

Mithilfe der Zuflussklappe kann der auf das Wasserrad fließende Zufluss unterbrochen werden. Folglich wird das Wasserrad beginnen abzubremsen, bis es zum Stillstand kommt. Dadurch fließt im gesamten SGS keine Energie mehr.

Thermoschutz des Generators

Um den Generator vor Überhitzung durch Überstrom zu schützen, wird ein Motorschutzschalter eingebaut.

Schalter

Der Schalter oder auch Haupt-Schütz unterbricht den Energiefluss des SGS. In Folge einer Fehlfunktion oder der manuellen Betätigung eines Not-Aus-Schalters wird auf elektrischer Seite den Energiefluss zwischen dem Generator und dem restlichen Zwischenkreis unterbrochen. Das System befindet sich somit im Leerlauf.

Ladekreis

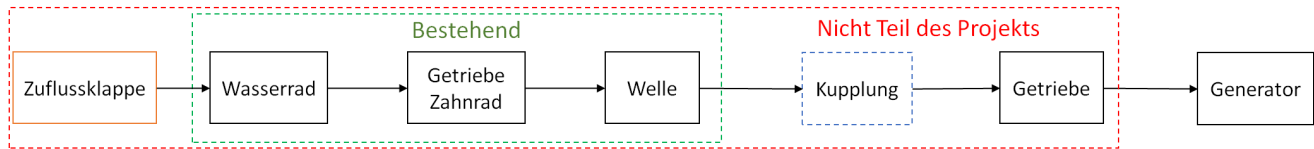
Durch das kapazitive Verhalten des Solarinverters kann es bei einem starken Generator zu hohen Einschaltströmen kommen. Im 'normalen' Betrieb begrenzt der Innenwiderstand der Solarzelle den Strom des Zwischenkreises. Da die Statorimpedanz des Generators viel kleiner ist, ist eine separate Strombegrenzung notwendig. Leistungswiderstände sind dafür gut geeignet. Sobald die Kapazität des Solarinverters geladen ist, werden die Widerstände überbrückt, um zusätzliche Verluste zu vermeiden.

DC-Sicherung

Der maximale Eingangsstrom des Solarinverters ist begrenzt. Um diesen vor Überstrom zu schützen, wird eine Sicherung verbaut.

Somit kann das Konzept um diese Sicherheitsmassnahmen erweitert werden. Der in Abbildung 4.3 rot markierte Teil ist von diesem Projekt abgegrenzt.

Mechanik



Elektrotechnik



Abbildung 4.3: Erweitertes Blockschaltbild des Konzepts mit Sicherheitseinrichtungen.

Die Logik der Abschaltung des Systems bzw. die Betätigung der Zufussklappe und des Schalters ist an diesem Punkt noch zu definieren. Dies ist jedoch erst beim Entwerfen des Steuer- und Regelsystems sinnvoll und wird deshalb erst im dazugehörigen Kapitel behandelt.

4.3 Dimensionierung

Durch die Berechnungen der mechanischen Nenndaten wird ersichtlich, dass die Leistung stark vom Zufluss abhängig ist. Deshalb ist es essenziell, einen realistischen Zufluss als Eingangsleistung anzunehmen. Durch Abklärungen wurde ein Zufluss von 10 bis 18 l/s, im Mittel ca. 15 l/s definiert. Dadurch ergibt sich die Leistungskurve in Abbildung 4.4. Bei dieser wurde das Drehmoment und die Drehzahl bereits auf die Welle umgerechnet.

$$N_{\text{Welle}} = N_{\text{Rad}} \cdot i_{\text{Welle}} \tag{4.1}$$

$$M_{\text{Welle}} = \frac{M_{\text{Rad}}}{i_{\text{Welle}}} \tag{4.2}$$

Der Arbeitsdrehzahl des Wasserrads wurde definiert als:

$$N_{\text{Rad,Arbeit}} = 4.5 \frac{\text{U}}{\text{min}} \tag{4.3}$$

Dies ist in der Abbildung 4.4 eingezeichnet.

Das Übersetzungsverhältnis zwischen Rad und Welle, ist gegeben:

$$i_{\text{Welle}} = 7.14 \tag{4.4}$$

Dadurch sind die mechanischen Eigenschaften der Welle definiert als:

Zeichen	Betrag	Einheit
N_{Nenn}	32	$\frac{\text{U}}{\text{min}}$
M_{Nenn}	400	Nm
M_{Max}	4200	Nm
P_{Nenn}	1330	W

Tabelle 4.1: Mechanische Nenndaten der Welle

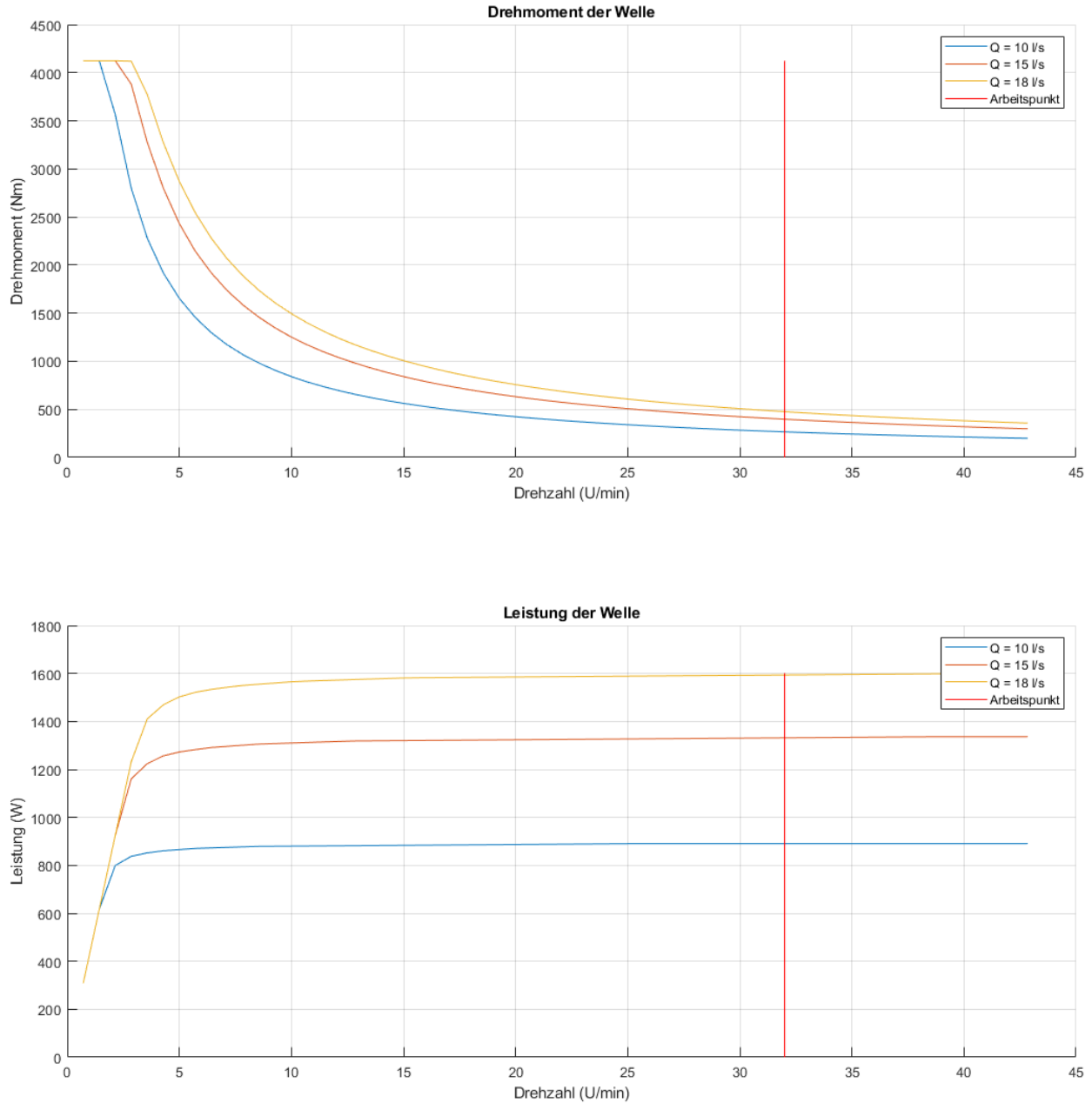


Abbildung 4.4: Berechnung der mechanischen Daten der Welle

Das maximale Drehmoment ist im Anlauf vorhanden. Beim Anfahren des Systems ist dessen Gegenmoment gering. Somit sind die mechanischen Komponenten nur im Falle einer mechanischen Blockierung dem maximalen Drehmoment ausgesetzt. Trotzdem ist es sinnvoll, dass die mechanischen Komponenten des SGS diesem standhalten können.

Die Definition von P_{Nenn} ist ein wichtiger Meilenstein für die weitere Dimensionierung des Systems. Der Generator und der Wechselrichter sollten somit eine ähnlich grosse Nennleistung aufweisen.

4.3.1 Generator

Für die Dimensionierung der Komponenten des SGS wird ebenfalls als Erstes der Generator recherchiert und bestimmt. Die Auswahl der Hersteller ist in der Diversität der Nenndaten beschränkt. Für die Selektion des permanentenerregten Synchrongenerators wurden folgende Anforderungsbereiche bestimmt:

Name	Wert	Einheit
Nennleistung	1.5 bis 4	kW
Nenndrehzahl	250 bis 1500	RPM
Nennspannung (effektiv, verkettet)	300 bis 700	V

Tabelle 4.2: Anforderungen an den Generator

Bei diesen Anforderungen wird eine akzeptable Überdimensionierung des Generators gewährleistet. Weiter wurde nach Hersteller recherchiert, um eine Auswahl an geeigneten Generatoren zu finden. Es stellte sich heraus, dass aufgrund der geringen Nennleistung nur wenige Generatoren die Anforderungen erfüllen. Unter diesen gab es einen klaren Favoriten, nämlich ein PM-Synchrongenerator aus dem Windkraftsegment. An dieser Stelle wurde durch die Projektbeteiligten entschieden, dass dieser Generator verwendet wird. Für die weitere Dimensionierung der Komponenten werden die Eigenschaften aus Tabelle 4.3 angenommen. Das Datenblatt befindet sich im Anhang [3]

Name	Wert	Einheit
Nennleistung	2.5	kW
Nenndrehzahl	500	RPM
Nennspannung	400	V

Tabelle 4.3: Nenndaten des PM-Synchrongenerators

4.3.2 Getriebe

Ausgehend von den mechanischen Eigenschaften der Welle (Tabelle 4.1) und des Generators (Tabelle 4.3) kann nun die Getriebe-Übersetzung bestimmt werden.

$$\text{Getriebe-Übersetzung} = \frac{\text{Nenndrehzahl Generator}}{\text{Nenndrehzahl Welle}} = 1 : 15.6 \quad (4.5)$$

4.3.3 Solar-Inverter

Typischerweise haben Drehstrom-Generatoren in dieser Leistungsklasse eine Nennspannung von 400V, so auch der gewählte Generator. Durch die Funktionsweise der B6-Brückenschaltung ist die DC-Ausgangsspannung definiert.

$$\bar{U}_{DC} = 1.35 \cdot U_{AC,eff} = 1.35 \cdot 400V = 540V \quad (4.6)$$

Herkömmliche Solar-Inverter arbeiten mit einer Eingangsspannung von 200 bis 1000V. Somit liegt die Ausgangsspannung des Gleichrichters in der Mitte und es ist keine Form eines DC-Stellers notwendig. Die Anforderungen an den Solarumrichter beschränken sich auf eine Nennleistung von ca. 2.5kW, die Möglichkeit ein Batteriesystem anschliessen zu können und eine serielle Verbindung aufbauen zu können.

Kommunikationsschnittstelle

Viele moderne Solar-Inverter bieten eine Kommunikationsschnittstelle mit TCP/IP oder Modbus RTU. Allerdings gibt es kein normiertes Protokoll unter den Herstellern. Das SunSpec-Protokoll wird aber durch einige grössere Hersteller verwendet. Deshalb wird ein Inverter mit diesem Protokoll gefordert.

Minimale Drehzahl

Die minimal benötigte Drehzahl des SGS kann bestimmt werden. Diese ist durch die minimale Eingangsspannung des Inverters gegeben. Bei herkömmlichen Inverter beträgt diese 200V. Nun kann zurückgerechnet werden, wie gross die Drehzahl der Welle mindestens sein muss, damit das SGS eingeschaltet werden kann.

Die minimale Spannung am Generator muss

$$U_{\text{Generator, min}} = \frac{\text{minimale Spannung des Inverters}}{\text{Faktor } \frac{U_{AC}}{U_{DC}} \text{ des Inverters}} = \frac{200\text{V}}{1.35} = 148.15\text{V} \quad (4.7)$$

betragen. Die dafür benötigte Drehzahl wird aufgrund der linearen Abhängigkeit von Spannung und Drehzahl über einen Dreisatz bestimmt. Die Nenndaten des Generators betragen hierbei 400V bei 500rpm. Somit muss die minimale Drehzahl des Generators

$$M_{\text{Generator, min}} = \frac{148.15\text{V} \cdot 500\text{rpm}}{400\text{V}} = 185.2\text{rpm} \quad (4.8)$$

betragen. Durch das berechnete Übersetzungsverhältnis des Getriebes beträgt die minimale Wellendrehzahl:

$$N_{\text{Welle, min}} = \frac{185.2\text{rpm}}{15.6} \approx 12 \frac{\text{U}}{\text{min}} \quad (4.9)$$

4.3.4 Ladekreis

Wie bereits erwähnt, ist ein Ladekreis notwendig, um den Zwischenkreis des Inverters zu laden. Dabei ist ein geringer Ladestrom ausreichend. Um die Notwendigkeit des Ladekreises zu demonstrieren, wurde ein Simulationsmodell wie in Abbildung 4.5 erstellt. Die Simulation wurde mit PLECS erstellt.

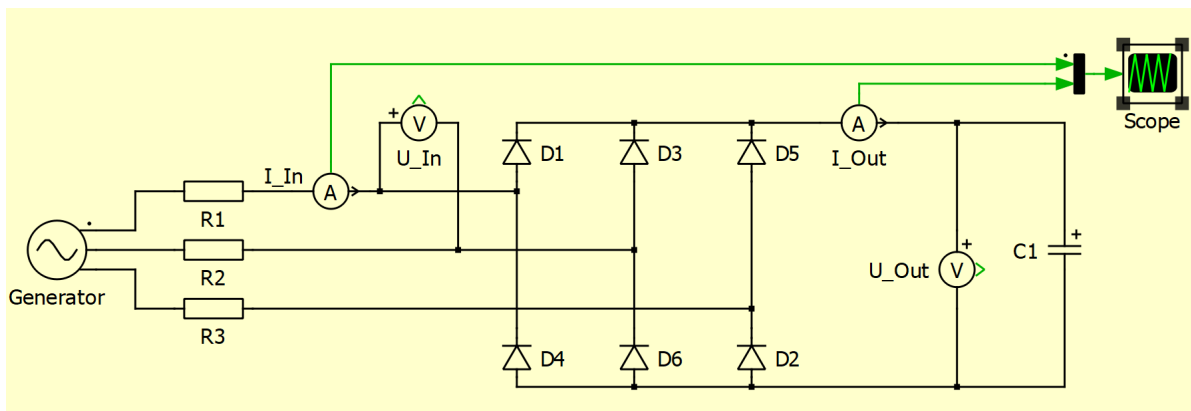


Abbildung 4.5: Simulationsmodell des SGS mit Generator, Gleichrichter und Kapazität des Inverters.

Dabei besteht die Lastimpedanz in diesem Modell lediglich aus einem Kondensator. Die Widerstände R1, R2 und R3 sind für die erste Simulation auf Null gesetzt. Dabei wird ersichtlich, dass der Strom im ersten Moment unendlich gross wird.

Für die folgende Berechnung wird der Ladestrom als 1A definiert.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{400\text{V}}{1\text{A}} = 400\Omega \quad (4.10)$$

Die Widerstände des Simulationsmodells [6] werden angepasst und in Abbildung 4.6 gezeigt.

Die Verwendung von Widerständen ist eine einfache und günstige Möglichkeit, den Strom zuverlässig zu begrenzen. In der realen Schaltung würde der Strom auch durch die Impedanz des Generators begrenzt werden. Da die Synchronreaktanz nur abgeschätzt werden kann, ist es sinnvoll, den Strom über die Widerstände zu begrenzen.

Im Simulationsergebnis in Abbildung 4.6 wird der Einschaltstrom erfolgreich auf 1A begrenzt.

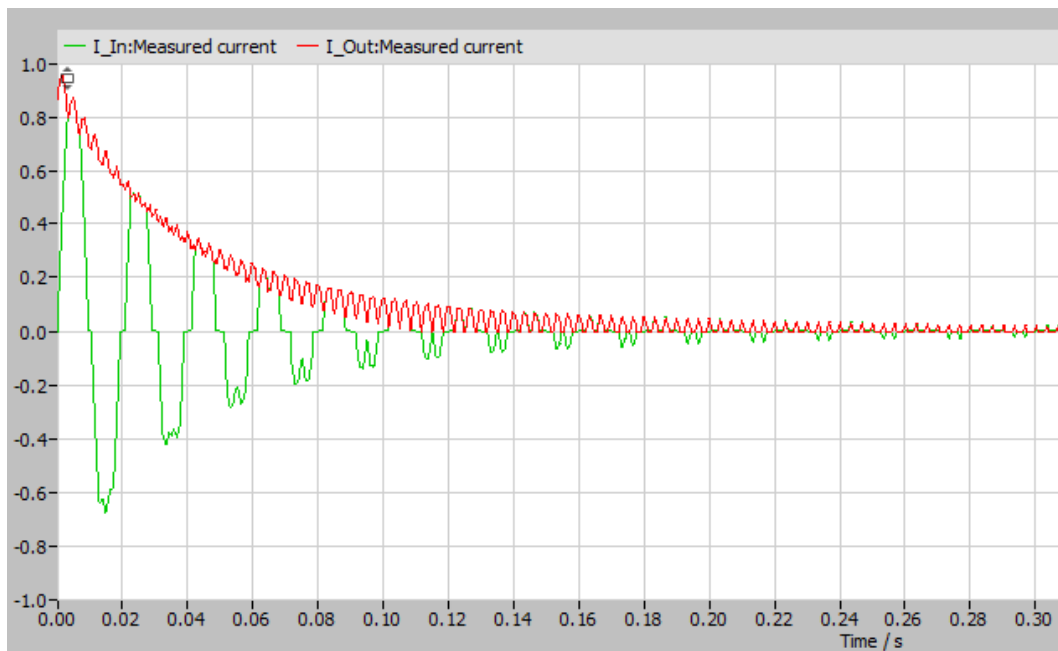


Abbildung 4.6: Simulation des Einschaltverhaltens mit Widerständen.

4.3.5 SPS

Was in diesem Dokument als SPS bezeichnet wird, beschreibt eine Logikcontroller, der nach Vorgaben arbeitet. Typischerweise wird in der Industrie eine SPS verwendet. Prinzipiell könnte auch ein PC mit entsprechendem Zubehör eingesetzt werden.

Durch die Verwendung einer SPS ist eine zukünftige Implementierung einer Visualisierung mit Fernzugriff oder eines Datenloggers einfach umzusetzen.

4.4 Wahl der Komponenten

Wie bereits erwähnt, wurde während der Recherche der Generator festgelegt. Dieser stammt von der Firma *Braun Windturbinen GmbH* [3] und wird üblicherweise bei kleineren Windkraftanlagen eingesetzt. Durch seine Nenndaten eignet er sich ideal für das SGS.

Obwohl das mechanische Teilsystem nicht weiter entwickelt wird, wurden Offerten für das Getriebe angefordert. Dabei zeigt sich ein Stirnradgetriebe der Firma *Alfred Imhof AG* [5] als geeignet. Es bietet eine Montagefläche für den Generator sowie eine Spannvorrichtung für einen Riementrieb. Im weiteren Design wird dieses Getriebe angenommen.

Durch die Forderung des SunSpec-Protokolls wird ein Wechselrichter der Firma *Fronius* empfohlen. *Fronius* ist einer der führenden Hersteller in der Solarbranche und bietet Hybrid-Inverter mit Speicheranbindung. Der *Symo GEN24 Plus* [4] mit einer Nennleistung von 3kW scheint dabei geeignet zu sein.

Die Anforderungen an die SPS sind relativ gering. Da ansonsten die Kosten stark steigen, ist eine Budget-SPS völlig ausreichend. Es wird eine *AC500-eCo* von *ABB* empfohlen.

In der weiteren Planung können zusätzlich benötigte Komponenten genauer bestimmt werden.

5 Schalt- und Regelungstechnik

Die Schalttechnik beschreibt die Logik, mit welcher das System funktioniert. Durch sie wird unter anderem die Betriebssicherheit gewährleistet. Bevor ein Schaltplan entworfen werden kann, müssen grundlegende Funktionen formuliert werden.

Damit das SGS funktionieren kann, muss das Wasserrad bereits drehen. Bei der Überschreitung der minimalen Drehzahl kann das SGS wahlweise automatisch oder vom Anlagen-Operator über einen Tastendruck eingeschalten werden.

5.1 Betriebsmodi

Hochfahren

Durch den Einschaltbefehl wird das System hochgefahren, in dem der Ladekreis zugeschaltet wird. Dabei kann ein Strom fließen, um den Zwischenkreis des Inverters zu laden. Sobald der Inverter bereit ist, wird die Ladeschaltung durch einen Leistungsschutz (gesteuerter Schalter) überbrückt. Anschliessend wird der Inverter freigegeben. Das System ist nun einsatzbereit.

Herunterfahren

Soll das SGS heruntergefahren werden, kann die Leistung des Inverters kontinuierlich verringert werden, bis er abgeschaltet wird. Anschliessend wird der Leistungsschutz geöffnet. Das elektrische System ist dann heruntergefahren und befindet sich im Leerlauf. Dadurch beschränkt sich die aufgenommene Leistung des SGS auf die Reibungsverluste.

Not-Aus

Im Notfall kann das System durch einen vor Ort montierten Not-Aus-Schalter abgeschaltet werden. Durch die Betätigung des Schalters wird der Leistungsfluss sofort unterbrochen, in dem der Hauptschalter geöffnet wird und die Zufussklappe den Zufluss unterbricht. Die SPS erkennt die Betätigung und fährt das System herunter. Das System muss anschliessend vom Operator neu gestartet werden. Dies beinhaltet die Rückstellung der Zufussklappe und des Not-Aus sowie das Hochfahren.

Dauerbetrieb

Sobald das System nach dem Hochfahren-Prozess bereit ist, beginnt der geregelte Dauerbetrieb. Seine Funktionsweise wird später im Kapitel beschrieben.

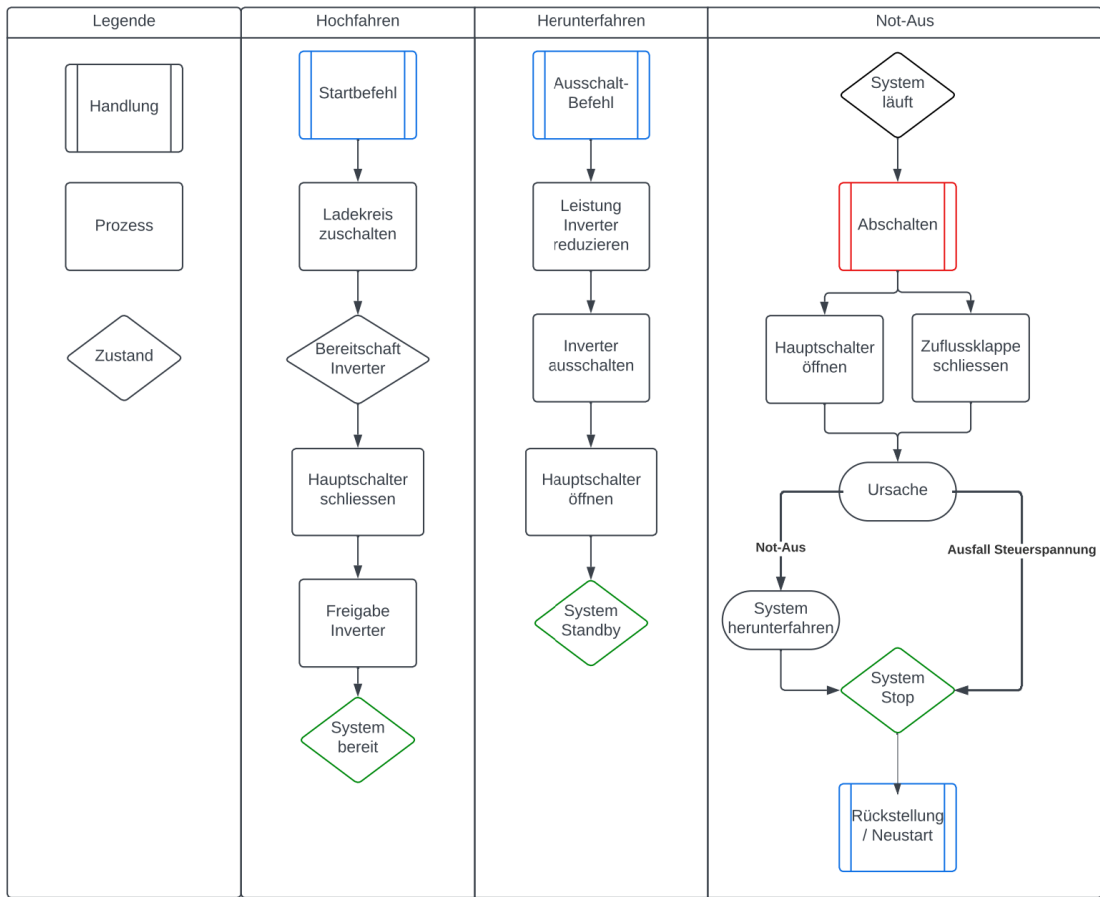


Abbildung 5.1: Flussdiagramm der Betriebsmodi

5.2 Schalt-Technik

Das SGS wird rein elektrisch gesteuert. Um die Schaltlogik des SGS zu beschreiben, wird ein Schaltplan [7] erstellt. Aus dem Feinkonzept in Abbildung 4.3 lässt sich das in Abbildung 5.2 gezeigte Schema herleiten.

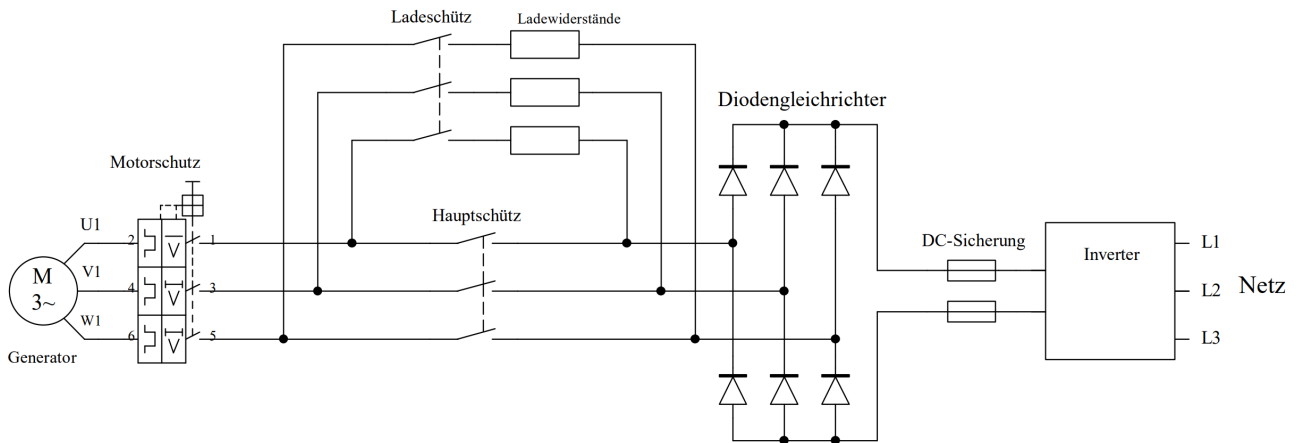


Abbildung 5.2: Grobe Schaltung des SGS

5.2.1 Einschaltlogik

Durch die relativ simple Schaltlogik könnte der Einschalt- und Not-Aus-Prozess durch eine altmodische Schützensteuerung erfolgen. Da aber für den geregelten Dauerbetrieb eine SPS notwendig ist, ist vor dem Hochfahren sicherzustellen, dass diese einsatzbereit ist. Deshalb werden Prozesse, wie das Einschalten oder die Freigabe des Inverters, durch die SPS ausgelöst. Praktisch bedeutet das, dass der Einschaltbefehl lediglich als Input der SPS angeschlossen ist.

Die genaue Funktion der Einschaltlogik kann aus dem Schema im Anhang verstanden werden. In Abbildung 5.3 wird die Einschaltlogik vereinfacht dargestellt. Wird der Ladeschütz betätigt, zieht das Hilfsrelais mit an. Dieses stellt sicher, dass der Ladeschütz betätigt wurde, bevor der Hauptschütz durch den Einschaltbefehl betätigt werden kann. Da sich die beiden Schütze gegenseitig überbrücken, kann der Ladeschütz nach dem Hochfahren wieder gelöst werden, ohne die Funktion zu beeinträchtigen. Die Zufussklappe ist immer aktiviert und wird nur durch die Betätigung des Not-Aus-Schalters gelöst.

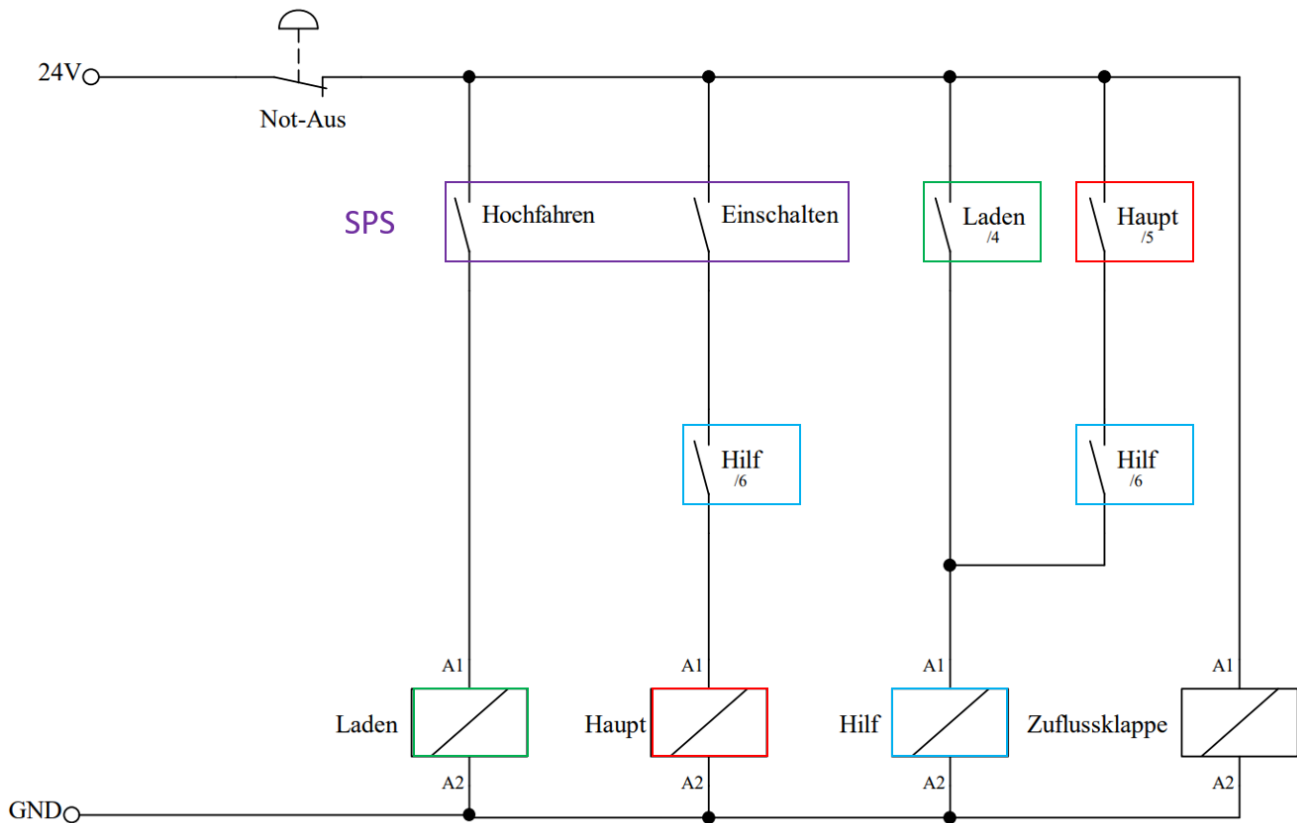


Abbildung 5.3: Einschaltlogik des SGS.

5.3 Regelsystem

In diesem Abschnitt wird grob das Regelsystem definiert, um die dafür nötigen Komponenten zu bestimmen. Der genaue Regelkreis ist im Folgeprojekt zu entwickeln. Das Konzept für das Regelsystem basiert auf der Annahme, dass eine Änderung der Wasserzflussmenge, eine Änderung in der Drehzahl bewirkt.

Das SGS ist für den Dauerbetrieb konzipiert. Dabei spielt das Regelsystem eine zentrale Rolle. Durch die serielle Kommunikation mit dem Inverter bestimmt die SPS die Leistung des Inverters. Diese entspricht der aktuellen Leistung des SGS und kann in Abhängigkeit des Zuflusses bzw. der Drehzahl variiert werden. Das Regelsystem stellt sicher, dass immer eine optimale Leistung aus dem Generatorsystem gewonnen wird.

5.3.1 Funktionskonzept

Durch das Einschalten des SGS kann die Drehzahl der Welle anhand der Ausgangsspannung des Generators gemessen werden. Das Ziel des Reglers ist es, die Drehzahl konstant auf Nenndrehzahl zu halten. Die Leistung, welche die SPS dem Inverter vorgibt, bestimmt das Gegenmoment für das Wasserrad. Durch Erhöhen oder Verringern der Leistung des Inverters, kann das Wasserrad also abgebremst oder beschleunigt werden. Ändert sich nun der Zufluss, ändert sich somit die Eingangsleistung des Systems. Der Regler erkennt dies an einer Änderung der Drehzahl und versucht für die neue Eingangsleistung eine optimale Ausgangsleistung zu finden. Falls die Show-Mühle eingekoppelt wird, kann das Regelsystem weiterhin funktionieren. Wenn die Mühle mehr Leistung aufnimmt, als das Wasserrad abgibt, erfolgt eine kontinuierliche Verringerung der Inverter-Leistung bis zur Abschaltung. Sollte die Mühle weniger Leistung aufnehmen, kann parallel dazu Strom gewonnen werden.

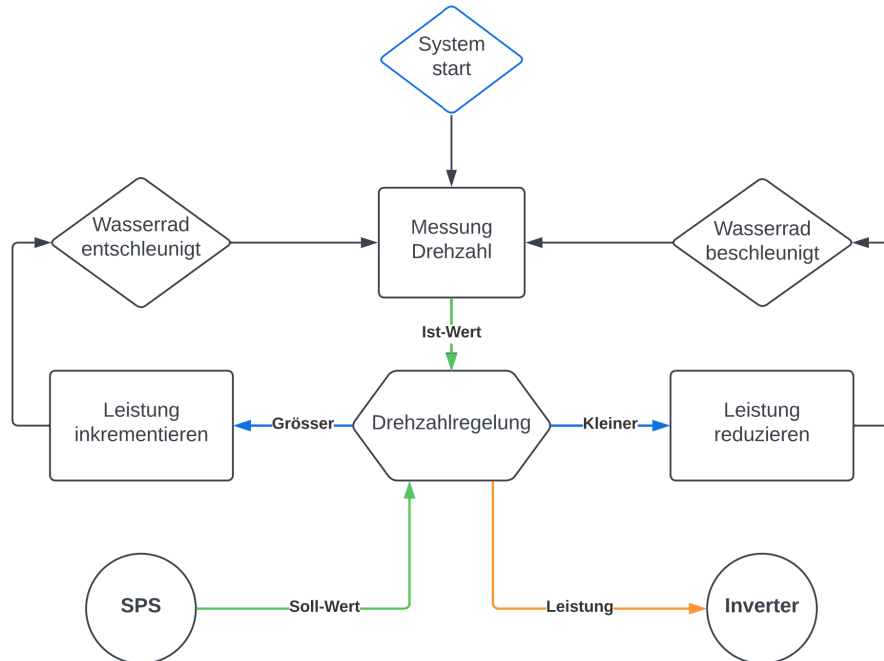


Abbildung 5.4: Flussdiagramm des geregelten Dauerbetriebs

5.3.2 Parametrierung des Inverters

Das Einstellen der Ausgangsleistung dient dem Regelsystem als Aktor. Durch das Verwenden eines Kommunikationsprotokolls können Register des Inverters gelesen und geschrieben werden. Dadurch kann die SPS Informationen des Inverters wie den Status und Eingangsgrößen lesen. Der Solar-Inverter fährt für das Maximum Power Point Tracking (MPPT) eine hinterlegte Kennlinie ab. Da die Kennlinie des Wasserrads nicht der der Solarzelle entspricht, muss der MPPT-Algorithmus überschrieben werden. Durch das Begrenzen der Ausgangsleistung wird letzteres erreicht.

5.3.3 Komponenten der SPS

Damit die SPS das System wie oben beschrieben steuern und regeln kann, benötigt sie digitale Ein- und Ausgänge sowie eine Möglichkeit, die Ausgangsspannung des Generators zu messen. Zusätzlich muss sie eine serielle Schnittstelle für die Kommunikation mit dem Inverter aufweisen. Um die Drehzahl des SGS messen zu können, ist eine Form eines Sensors notwendig. Beispielsweise kann ein Drehzahlsensor Abhilfe schaffen. Alternativ könnte ein Steckmodul für die SPS infrage kommen, welches die Generatorspannung und -frequenz misst. Dies könnte auch über eine Messschaltung erreicht werden.

6 Aufbau und Montage des Systems

6.1 Komponentenliste

Durch die bisherige Arbeit sind nun alle Teilsysteme und Komponenten bestimmt. Zur Übersicht werden sie in diesem Abschnitt beschrieben und aufgezählt.

6.1.1 Mechanischer Aufbau

Der Antrieb des Getriebes wird mit der Welle verbunden. Der Abtrieb wird auf den Riementrieb geführt, welcher den Generator antreibt.

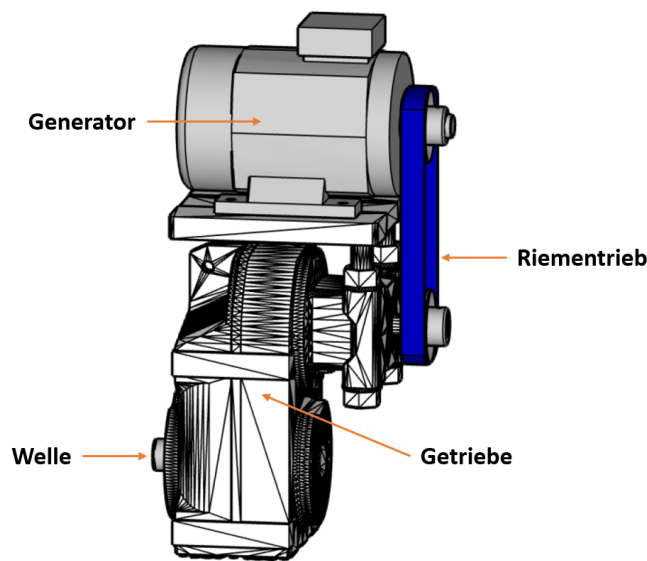


Abbildung 6.1: Mechanischer Aufbau des SGS

Das mechanische Teilsystem besteht aus:

- Getriebe
- Riementrieb
- Generator

Der in Abbildung 6.1 gezeigte Aufbau ist als Konzept zu verstehen. Im Rahmen dieses Projekts wird die Konstruktion der Mechanik **nicht** weitergeführt, dazu sollte eine Fachperson beigezogen werden. Fortan beschränkt sich die Entwicklung auf den elektrotechnischen Teil des SGS.

6.1.2 Elektrotechnischer Aufbau

Die elektrischen Komponenten werden über Kabel miteinander verbunden, dadurch ist die räumliche Anordnung flexibel. Das elektrische System besteht aus:

- Generator
- Schaltgerätekombination (SGK)
- Inverter

SGK

In der SGK werden viele der zusätzlich benötigten Komponenten untergebracht.

Komponente	Beschreibung
Schaltschrank	In welchem die folgenden Komponenten verbaut sind
Diodengleichrichter	Um die Generatorspannung gleichzurichten
Ladekreis	Bestehend aus Widerständen, um den ZK des Inverters zu laden
SPS	Die gesamte Steuereinheit inklusive Controller, IOs und Netzteil
Sicherheitseinrichtungen	Bestehend aus Sicherungen und Schutzschaltern
Schaltteile	Schütze und Relais zum Schalten des SGS
Kleinmaterial	Klemmen, Drähte, DIN-Schienen und Hülsen für einen sauberen Aufbau der SGK

Tabelle 6.1: Komponenten der SGK

Elektrische Installation

Zusätzlich sind noch folgende Komponenten notwendig:

Komponente	Beschreibung
Not-Aus-Schalter	Für die sofortige Abschaltung des SGS
Bedienfeld	Bestehend aus zwei Schaltern um das System Hoch- und Herunterzufahren
Diverse Kabel	Für die Erschliessung der elektrischen Komponenten, dazu gehören auch Erdungskabel
Drehschalter	Um den Inverter und den Generator im Revisionsfall zu unterbrechen
Installationsmaterial	Rohre und Kanäle um die Kabel fachgerecht zu verlegen

Tabelle 6.2: Restliche Komponenten für die elektrische Installation

6.1.3 Budget

Durch die genauere Bestimmung aller Komponenten kann nun ein Kostenplan erstellt werden, um das benötigte Budget für das SGS abschätzen zu können. Der Kostenplan ist in Abbildung 6.2 gezeigt.

Zuzüglich kommen Transportkosten und Mehrwertsteuer. Die angegebenen Preise im Kostenplan sind durch Recherche abgeschätzte Werte. Des Weiteren sind die Preise herstellerabhängig. Das Kostendach für die elektrotechnischen Komponenten des SGS kann somit auf **ca. 10'000 CHF** geschätzt werden.

Weitere Kosten entstehen bei der Installation der Komponenten. Dieser Aufwand kann allerdings nicht geschätzt werden. Zusätzlich kommen noch Gebühren für den elektrischen Sicherheitsnachweis. In der Abbildung 6.2 ist ein Lithium-Speicher aufgeführt, aber nicht mit eingerechnet. Dies dient lediglich zur Abschätzung der Anschaffungskosten.

6.1.4 Ersatzteile

Das SGS ist sowohl mechanisch als auch elektrisch robust, dadurch gibt es nicht viele Verschleissteile. Trotzdem sollten gewisse Ersatzteile vorgesehen werden, da ihre Zerstörung den Verlust der Stromerzeugung bewirken.

Die folgenden Komponenten sind potenziell anfällig auf Zerstörung, aber günstig zu ersetzen:

- Riemen
- Diodengleichrichter
- Widerstände

Komponente	Produkt	Lieferant	Lieferzeit	Einzelpreis	Anzahl	Total [CHF]
Hauptkomponenten						4000
Generator 2.5kW	Braun Synchrongenerator	Braun	3 Wochen	2200.00	1	2200
Inverter 3kW	Fronius GEN24	Solarmarkt	1 Woche	1800.00	1	1800
Lithium-Speicher 10.2kWh	BYD Battery-Box	Solarmarkt	1 Woche	5500.00		0
SGK						2085
Schaltschrank		Otto Fischer	3 Tage	400.00	1	400
Motorschutz		Otto Fischer	3 Tage	80.00	1	80
Diodengleichrichter			5 Tage	40.00	2	80
Widerstände			5 Tage	10.00	3	30
DC-Sicherung		Otto Fischer	3 Tage	60.00	1	60
LS 3x16A		Otto Fischer	3 Tage	65.00	1	65
LS 1x13A		Otto Fischer	3 Tage	30.00	1	30
SPS Controller	ABB AC500-eCo	ABB	1 Woche	500.00	1	500
Drehzahlsensor			1 Woche	120.00	1	120
Netzteil 24V		Otto Fischer	3 Tage	150.00	1	150
Schütze		Otto Fischer	3 Tage	80.00	2	160
Relais		Otto Fischer	3 Tage	30.00	5	150
Hilfskontakte		Otto Fischer	3 Tage	30.00	2	60
Kleinmaterial		Otto Fischer	3 Tage			200
Elektrische Installation						1220
Not-Aus-Schalter		Otto Fischer	3 Tage	80.00	1	80
Bedienfeld		Otto Fischer	3 Tage	120.00	1	120
Diverse Kabel		Otto Fischer	3 Tage			200
Drehschalter		Otto Fischer	3 Tage	110.00	2	220
Kanal / Rohr		Otto Fischer	3 Tage			50
Potenzialausgleichschiene		Otto Fischer	3 Tage	30.00	1	30
Smartmeter	Fronius Smart Meter TS	Solarmarkt	1 Woche	200.00	1	200
Messwandler	Fronius Smart Meter CT A	Solarmarkt	1 Woche	80	4	320
TOTAL						7305

Abbildung 6.2: Kostenplan elektrotechnische Komponenten des SGS

6.2 Nahtstellen

Die Nahtstellen bezeichnen den Übergang von Teilsystemen. Dabei wird zwischen externen und internen Nahtstellen unterschieden. Externe Nahtstellen bezeichnen die Systemgrenzen des SGS. Diese sind für die Gesamtplanung des Projekts ausserhalb des SGS relevant. Interne Nahtstellen bezeichnen Übergänge zwischen Teilsystemen des SGS und sind u. A. für Revisionen relevant.

6.2.1 Externe Nahtstellen

1. **Welle:** Die Welle des Wasserrads stellt die mechanische Nahtstelle dar. Der Verbindung der Welle auf das Getriebe wird nicht definiert, da dies durch die Expertise einer Fachperson konstruiert werden sollte.
2. **Riementrieb:** Die Verbindung zwischen der Ausgangswelle des Getriebes und der Welle des Generators erfolgt mittels eines Riementriebs. Dieser ist ebenfalls durch eine Fachperson zu dimensionieren.
3. **Netzanschluss:** Die elektrische Nahtstelle des SGS ist ein Anschluss an das Verteilnetz. Dadurch wird das SGS mit elektrischer Energie für die Steuerung versorgt und die gewonnene Leistung kann zurückgepeist werden.

Da das SGS als Energieerzeugungs-Anlage gilt, müssen die Anschlussbedingungen der Netzbetreiberin geprüft werden. Absehbar ist ein separat abgesicherter Abgang in der Hauptverteilung. Zusätzlich muss ein Smart-Meter installiert werden.

4. **Zuflussklappe:** Eine weitere Nahtstelle ist die Zuflussklappe. In der Schaltlogik ist eine Ansteuerung der Zuflussklappe implementiert. Die mechatronische Funktion ist nicht definiert.
5. **HMI:** Das Human-Machine-Interface dient zur Bedienung des SGS. Es beinhaltet die Ein- und Ausschaltknöpfe sowie die Möglichkeit ferngesteuert zu werden. Die Fernsteuerung muss noch definiert und implementiert werden.
6. **Raum:** Die Komponenten des SGS beanspruchen einen Platz im Raum. Die Örtlichkeiten sind durch den Auftraggeber festzulegen. Dabei weisen die elektrischen Komponenten SGK und Inverter eine flexible Anordnung auf, da sie über beliebig lange Kabel miteinander verbunden werden.

6.2.2 Interne Nahtstellen

1. **Kabel und Klemmen:** Durch Kabel werden externe Komponenten an die SGK angeschlossen. Dabei müssen Normen und Vorschriften beachtet werden.
2. **Sicherheitseinrichtungen:** Die SGK beinhaltet Schutzschalter und Sicherungen, womit Komponenten elektrisch getrennt werden können.
3. **Drehschalter:** Mit dem Drehschalter ist eine vollständige galvanische Trennung des Generators sowie des Inverters möglich.
4. **Serielle Verbindung:** Durch die Anforderung einer seriellen Verbindung zwischen der SPS und dem Inverter erfolgt ein Datenaustausch zwischen zwei eigenständigen Systemen.

6.3 Montage des Systems

In diesem Projekt wird das SGS nur theoretisch bestimmt. Wie so oft ist die Theorie und die Praxis nicht immer einstimmig. Mit der Grobplanung der Montage können einige Abweichungen bestimmt werden. Dieser Abschnitt beschreibt die ungefähre Reihenfolge der Montage und Inbetriebnahme. Zusätzlich werden Anforderungen zum jeweiligen Schritt beschrieben.

1. Montage der mechanischen Komponenten

Weil es ortsgebunden ist, soll als Erstes das mechanische Teilsystem des SGS montiert werden. Beim vorgeschlagenen Konzept aus Abbildung 6.1 ist eine Adapterplatte zwischen Getriebe und Generator vorzusehen.

2. SGK

Die SGK kann bereits vor der Montage zusammengebaut werden. Der Auftraggeber definiert den Ort, an welchem die SGK an die Wand montiert wird.

3. Inverter

Der Solar-Inverter wird am vorgesehenen Ort montiert. Falls ein Batterie-System eingesetzt wird, muss dieser im Abstand von max. 3 m zum Inverter installiert werden.

4. Elektrische Installation

Als Nächstes sollten alle restlichen elektrischen Komponenten montiert werden. Dies beinhaltet Drehschalter, Bedienfeld und Not-Aus-Schalter. Die Montageorte und -bedingungen ergeben sich aus der Kombination der Niederspannungs-Installationsnormen (NIN) und den Bestimmungen des Auftraggebers.

5. Anschluss

Nun können alle Komponenten angeschlossen werden. Dafür wurde ein Anschlussschema erstellt.

6. Inbetriebnahme

Das SGS kann nun in Betrieb genommen werden. Die Inbetriebnahme-Prozedur ist noch zu definieren.

7. Sicherheitsnachweis

Zum Schluss muss die Anlage durch eine fachkundige Person geprüft und abgenommen werden. Dies erfolgt im Rahmen eines Sicherheitsnachweises.

Der Auftraggeber ist verantwortlich für alle Abklärungen zur Realisierung des SGS. Diese beinhalten die definitiven Abklärungen zum Netzanschluss inkl. Anschlussbewilligung, das Organisieren von Fachkräften für die Montage, die vorgängige Fertigung von erforderlichen Konstruktionen sowie die Bestimmung der Montageorte.

Um das Ergebnis dieses theoretischen Projekts zu visualisieren, wurde das in Abbildung 6.3 gezeigte 3D-Modell [8] erstellt.

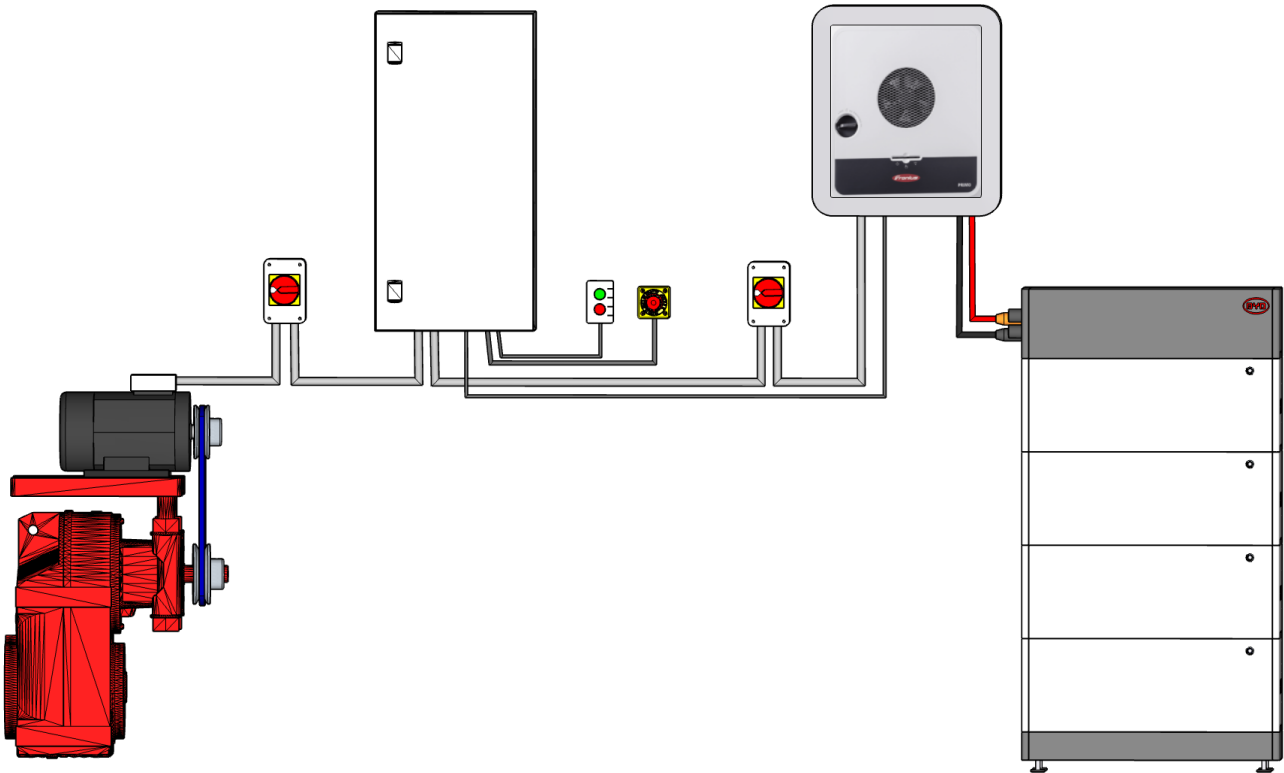


Abbildung 6.3: Finaler Aufbau des SGS. Qualitativ in einer CAD-Software gezeichnet.

7 Abschluss

Mit der bisherigen Arbeit ist die Projektierung des SGS abgeschlossen. Nachstehend werden die Anforderungen aus der Projektvereinbarung [1] noch einmal überprüft und weiterführende Schritte formuliert.

7.1 Validierung

Während der Projektierung waren mehrere Validierungsschritte notwendig. Als Erstes war die Überprüfung der Nenndaten des Wasserrads notwendig, um das SGS korrekt dimensionieren zu können. Mit den vom Auftraggeber bereitgestellten Informationen konnten Berechnungen zu den mechanischen Nenndaten gemacht werden [2].

Um Lösungsansätze formulieren zu können, mussten funktionale Konzepte überlegt werden. Diese mussten im Rahmen von Literatur und Fachgesprächen auf ihre Korrektheit und Funktionalität geprüft werden. Für das Konzept 1 war ein existierendes Modell zur Hand. Das Modell umfasste PM-Synchrongenerator, Brückengleichrichter, Solar-Inverter und SPS. Um den Generator anzutreiben, ist eine Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter vorhanden. Dadurch war ein Proof of Concept gegeben. Das Modell wurde ursprünglich für ein anderes Projekt entwickelt.

Im Verlauf des Projekts gab es mehrere Meetings, die unter anderem zur Validierung beigetragen haben. Bei den Meetings wurde oftmals der aktuelle Erkenntnisstand präsentiert und die Möglichkeiten besprochen. Dies trifft beispielsweise auf die Komponentenwahl zu. Durch die Besprechungen konnten Optionen auf ihre Eignung geprüft werden.

7.2 Vergleich zur Projektvereinbarung

In der Projektvereinbarung sind Anforderungen definiert. Das Ergebnis der Projektierung soll auf diese geprüft werden. Zur Übersicht sind die Anforderungen aus der Projektvereinbarung in der nachfolgenden Tabelle nochmals gezeigt. Die Tabelle wird durch eine Beschreibung des Ergebnisses ergänzt.

Nr.	Anforderung	Beschreibung aus der Projektvereinbarung	Erfüllt	Ergebnis
1	Lösungsansätze formulieren	Es sollen 2-3 Lösungsansätze vorgeschlagen werden.	Ja	Es wurden 2 funktionale Konzepte sowie mögliche Komponenten formuliert
2	Mechanik	Das System muss den gegebenen physikalischen Eigenschaften standhalten.	Nein	Die Dimensionierung erfüllt die Anforderung, allerdings wurden die mechanischen Komponenten weggelassen.
3	Komponenten	Die ausgesuchten Komponenten müssen Standard-Produkte auf dem europäischen Markt sein.	Ja	Alle Komponenten wurden durch Recherche und Anfragen gefunden.
4	Betriebszustände	Das System muss für den vollautomatischen Dauerbetrieb ausgelegt sein. Ausserdem muss es an- und abschaltbar sein.	Ja	Die Betriebsmodi Hoch- und Herunterfahren wurden definiert. Das Regelkonzept für den Dauerbetrieb wurde entworfen.
5	Auslesbare Parameter	Mechanische Parameter wie die Drehzahl als auch elektrische Parameter wie Ströme und Spannungen müssen über eine Kommunikationsschnittstelle zur Verfügung stehen.	Vorgesehen	Der Solar-Inverter bietet Kommunikationsmöglichkeiten an. Durch die SPS ist eine Bereitstellung der Daten grundsätzlich möglich. Die Anforderungen für das Auslesen der Parameter wurde nicht definiert.
6	Fernsteuerung	Eine ferngesteuerte Abschaltung des Systems muss gewährleistet sein.	Vorgesehen	Durch die SPS kann eine Netzwerkanbindung erfolgen, mit welcher das System über ein Interface gesteuert werden kann.
7	Not-Aus	Die Anlage soll über einen Not-Aus-Schalter vor Ort vom Antrieb entkoppelt werden können.	Ja	Die Funktion des Not-Aus-Schalters ist definiert. Durch die Betätigung wird auf elektrischer Seite unterbrochen. Zusätzlich ist die Ansteuerung einer Zufussunterbrechung vorgesehen.
8	Regelsystem	Es soll ein machbares Regelsystem entworfen und umgesetzt werden.	Teilweise	Das Regelsystem wurde entworfen, ist aber noch zu entwickeln.
9	Verkabelung	Die verwendeten Kabel müssen die vorgegebenen Eigenschaften erfüllen.	Nein	Ein Anschlussschema [7] mit Dimensionen der Kabel wurde erstellt. Der genaue Kabeltyp wird dabei nicht spezifiziert.
10	Dreh Sinn	Das Verkabelungsschema muss den richtigen Dreh Sinn sicherstellen.	Ja	Das Verkabelungsschema [7] beschreibt den Anschluss der Komponenten.
11	Aufstellorte	Die Aufstellorte der Komponenten sind festzulegen.	Nein	Die ungefähren Dimensionen der Komponenten wurden kommuniziert, bzw. ergeben sich aus den Datenblättern [3][4][5]. Die Aufstellorte sind durch den Auftraggeber festzulegen.

7.3 Rückblick

Mit den vom Auftraggeber bereitgestellten Daten wurde eine dynamische Berechnung der mechanischen Nenndaten durchgeführt. Durch die Wahl des Lösungskonzepts mit Synchrongenerator und Solar-Inverter ist die Grundlage für das SGS gegeben. Durch weitere Überlegungen konnte ein Feinkonzept des Systems entwickelt werden. Mithilfe der anfänglichen Berechnungen konnten die Komponenten des SGS erfolgreich dimensioniert werden. Allerdings wurde die mechanische Konstruktion abgegrenzt. Weiter wurden Betriebsmodi definiert und die Schaltlogik der SGK definiert. Ein Regelkonzept wurde entworfen, welches aber im Folgeprojekt weiterzuentwickeln ist. Des Weiteren wurde ein Budget für den elektrotechnischen Teil des SGS erstellt.

Das SGS kennt die Betriebsmodi Hoch- und Herunterfahren, Not-Aus sowie den geregelten Dauerbetrieb. Mit der Schaltlogik der SGK und der Anordnung der Komponenten ist die Betriebssicherheit gewährleistet.

Durch die Berechnung der Nenndaten der Welle kann die erwartete elektrische Leistung des SGS mit 1.3kW beziffert werden. Mit der Komponentenwahl beträgt die Nenn-Arbeitsleistung jedoch 2.5kW. Eine genauere Leistungsbestimmung des realen Systems kann nach der Realisierung des SGS durchgeführt werden.

7.4 Ausblick

Damit das SGS realisiert werden kann, sind weitere Entwicklungsschritte notwendig. Zum einen muss das Regelkonzept verfeinert werden. Dazu sollte eine geeignete Messmethode für die Drehzahl des SGS definiert werden. Weiter ist die Programmierung der SPS zu erledigen sowie die Implementierung des SunSpec-Protokolls für die Kommunikation mit dem Wechselrichter. Anschliessend kann das System mithilfe von Testläufen auf seine Funktion geprüft und optimiert werden. Des Weiteren ist eine Inbetriebnahme-Prozedur zu überlegen, um die korrekte Funktion des SGS gewährleisten zu können. Schlussendlich sollte eine technische Bedienungsanleitung für das SGS geschrieben werden.

Weitere notwendige Schritte werden sich im Verlauf des Folgeprojekts noch offenbaren. Zusätzliche Funktionen wie eine Visualisierung und Fernsteuerung des SGS könnten ebenfalls entwickelt werden.

7.5 Schlusswort

Dieses Projekt hat mit viel Freude bereitet. Weil es nicht ein rein elektrotechnisches Projekt ist, sondern auch Aspekte der Mechanik und Systemtechnik umfasst, war mein Lerngewinn sehr gross. Obwohl sich die Recherche nach einem geeigneten Generator als Herausforderung offenbart hat, konnte ich die Probleme im Verlauf dieser Projektarbeit gut lösen. Dies ist unter anderem dank der guten Zusammenarbeit mit dem *v-kmb* sowie den Projektoachs.

A Anhang

Die für diese Dokumentation relevanten Dokumente befinden sich im Abgabeordner.

Die vom *vkmb* bereitgestellten Dokumente werden in Tabelle A.1 aufgelistet. Weitere Ergebnisse dieses Projekts sind in Tabelle A.2 aufgelistet.

Ziffer	Name	Format	Autor
0.1	VKMB-DOK-162 Lastenheft	.pdf	vkmb
0.3	VKMB-EXT-088 Mechanik	.pdf	vkmb
0.3	VKMB-DOK-099 Auslegung	.pdf	vkmb

Tabelle A.1: Dokumente des v-kmb

Ziffer	Name	Format	Autor
1	Projektvereinbarung	.pdf	JS
2	Berechnungen	.m, .xlsx	JS
3	Datenblatt Generator	.pdf	Braun Windturbinen GmbH
4	Datenblatt Solar-Inverter	.pdf	Fronius Schweiz AG
5	Datenblatt Getriebe	.pdf	Alfred Imhof AG
6	Simulation	.plecs	JS
7	Elektroschema	.pdf	JS
8	CAD Zeichnung	.skp, .stl	JS

Tabelle A.2: Anhang