



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Franz Flockenhaus

Optimierung des anlagentechnischen Aufbaus eines Pumpspeichermodells und Erstellung von MATLAB-basierter Steuersoftware zur Integration in ein Smart-Grid

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Franz Flockenhaus
Optimierung des anlagentechnischen
Aufbaus eines Pumpspeichermodells
und Erstellung von MATLAB-basierter
Steuersoftware zur Integration in ein
Smart-Grid

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau (MSc)
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Thomas Veeseer
Zweitprüferin : Prof. Dr. Birgit Koeppen

Abgabedatum: 29.08.2019

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Franz Flockenhaus

Thema der Masterthesis

Optimierung des anlagentechnischen Aufbaus eines Pumpspeichermodells und Erstellung von MATLAB-basierter Steuerungssoftware zur Integration in ein Smart-Grid

Stichworte

Pumpspeicherkraftwerk, Smart Grid, Erneuerbare Energien, Steuerung, MATLAB

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Optimierung hydraulischer Komponenten eines Pumpspeichermodells und der Entwicklung einer Steuerungssoftware zur Integration der Anlage in ein Smart Grid-Modell.

Die Überarbeitung der hydraulischen Komponenten ergab, dass der Speicherbehälter neu ausgelegt werden muss. Außerdem wurden zusätzliche Armaturen und Instrumente integriert und der Rohrleitungsverlauf angepasst. Die Steuerungssoftware wurde in Form einer MATLAB-App programmiert und auf die elektrischen Komponenten der Anlage zugeschnitten.

Das Ergebnis der Arbeit ist eine funktionsfähige App mit der sich das Pumpspeichermodell steuern lässt. Die gewonnenen Messdaten werden dabei gespeichert und können mit einem angehängten Skript ausgewertet werden.

Name of student

Franz Flockenhaus

Title of the paper

Optimization of the plant engineering design of a pumped storage model and creation of MATLAB-based control software for integration into a smart grid

Keywords

Pumped storage hydropower plant, Smart Grid, Renewable Energy, Controller, MATLAB

Abstract

This thesis deals with the optimization of hydraulic components of a pumped storage model and the development of a control software for the integration of the plant into a smart grid model.

The revision of the hydraulic components showed that the storage tank needs to be redesigned. In addition, several fittings and instruments were integrated and the pipe run adjusted. The control software was programmed in the form of a MATLAB app and tailored to the electrical components of the system.

The result of the thesis is a working app with which the pump storage model can be controlled. The acquired measurement data are stored and can be evaluated with an attached script.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Inhaltsverzeichnis	ii
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vi
Formelverzeichnis	vii
Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	viii
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	4
3 Pumpspeicher (Stand der Technik)	5
3.1 Pumpspeichervarianten	7
3.1.1 Herkömmliche Pumpspeicher	7
3.1.2 Kanalpumpspeicher (H. Degenhart, T. Schomerus, D. Schulz, Quelle [1]).....	8
3.1.3 Unterflur-Pumpspeicherwerk/ Bergwerkspeicher (Quelle [2]).....	9
3.1.4 Lageenergiespeicher (Heindl Energy, Prof. Dr. E. Heindl, Quelle [29] & [44])	10
3.1.5 Ringwallspeicher (Dr. Matthias Popp, Quelle [5] & [25]).....	13
3.2 Vergleich der Konzepte und weitere Möglichkeiten.....	15
3.3 Modellanlage eines Pumpspeichers	17
4 Smart Grid	18
4.1 Definition	18
4.2 Funktionsweise	18
4.3 Smart Grid als Grundlage der Energiewende.....	19
5 Anlagentechnische Optimierung des Pumpspeichermodells	20
5.1 Grundaufbau der Anlage.....	20
5.1.1 Hauptkomponenten der Anlage	20
5.1.2 Probetrieb der Anlage.....	29
5.2 Optimierung(-spotenzial) des Grundaufbaus.....	30
5.3 Neuaufbau der Anlage.....	33
5.3.1 Konzeptionierung, Konstruktion und Fertigung des neuen Behälters	33
5.3.2 Umbau und Anpassung der Komponenten	43
5.4 Aufbau der neuen Anlage	53
5.5 Optimierungspotenzial des Neuaufbaus	55
6 Erstellung der Steuersoftware in MATLAB	56
6.1 Benutzeroberfläche der App	57
6.1.1 Beschreibung der Oberfläche	59
6.2 MATLAB-Code (AppDesigner Code View).....	63
6.2.1 Funktionsprogrammierung der Benutzeroberfläche	63
6.2.2 Messboxunabhängige Funktionen	64
6.2.3 Code-Vorlagen von LabJack (Skripte und Funktionen)	65
6.2.4 Integration der Messbox in die App(-Oberfläche).....	66
6.3 Elektro-hydraulisches (Steuer-) Schaltbild der Anlage – Zusammenfassung	74
6.4 Smart Grid Integration	76

7	Test und Anpassung von Anlage und Steuersoftware	78
7.1	Vermessung der Turbine (Hardwaretest)	78
7.1.1	Versuchsdurchführung	78
7.1.2	Analyse der Versuchsergebnisse	78
7.2	Funktionstest der Anlage im Betrieb (Softwaretest)	80
7.2.1	Pumpensteuerung	80
7.2.2	Generatorleistung	80
7.2.3	Füllstand	80
7.2.4	Volumenstrom	81
7.2.5	Steuersoftware	81
7.3	Test der Pumpen	83
7.4	Anpassungen aufgrund der Messergebnisse und Beobachtungen	84
7.5	Erzeugung der App (Packaging)	87
8	Fazit - Ergebnis	88
9	Ausblick – Anpassungen von Software und Hardware	90
9.1	Notwendige Modifikationen	90
9.2	Ergänzende Modifikationen	92
	Anhangsverzeichnis	viii
	Quellenverzeichnis	ix

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Arten von Regelleistung.....	1
Abbildung 3-1: Modell Pumpspeicher	5
Abbildung 3-2: Skizze Unterflur-Pumpspeicher	10
Abbildung 3-3: Skizze Lageenergiespeicher.....	11
Abbildung 3-4: Beispiel Ringwallspeicher	13
Abbildung 5-1: Pelton-Turbine	20
Abbildung 5-2: Leistungsdaten der Pumpen	22
Abbildung 5-3: Temperaturentwicklung der Pumpen bei 23,9°C Umgebungstemperatur. 23	
Abbildung 5-4: Reflex Membran-Druckausdehnungsgefäß Baureihe S	24
Abbildung 5-5: Prinzip-Skizze Membran-Druckausdehnungsgefäß	24
Abbildung 5-6: Technische Daten Kaltwasserzähler	26
Abbildung 5-7: 3D-Modell des Grundaufbaus des Pumpspeichersmodells.....	27
Abbildung 5-8: Foto des Grundaufbaus der Anlage	28
Abbildung 5-9: DGRL, Anhang II, Diagramm 2	36
Abbildung 5-10: Kategorien der DGRL	36
Abbildung 5-11: Maße Klöpperboden	39
Abbildung 5-12: Fertigungszeichnung des Behälters inkl. TÜV-Abnahme nach Vorprüfung40	
Abbildung 5-13: Ablaufdiagramm zur Modulwahl (DGRL).....	42
Abbildung 5-14: 3D-Modell und Maßzeichnung des Trichters.....	43
Abbildung 5-15: Technische Daten Sicherheitsventil (Art.-Nr. SV 12 8-10 MS)	45
Abbildung 5-16: Beschreibung Netzteil VOLTCRAFT DPPS-16-40	46
Abbildung 5-17: Voltcraft DPPS-16-40, Kontaktbelegung des Fernsteueranschlusses	47
Abbildung 5-18: Messbox LabJack U6 mit LJTick-DAC	48
Abbildung 5-19: LJTick-DAC Anschlüsse	48
Abbildung 5-20: CB37 Terminalboard für LabJack U6.....	49
Abbildung 5-21: Foto des Schiebewiderstandes mit Typenschild	49
Abbildung 5-22: Gleichstromquelle für die Versorgung der Sensoren (Beispielbild).....	51
Abbildung 5-23: Stromsensor CYCT03-xnS3 und Schaltplan	51
Abbildung 5-24: R&I der umgebauten Anlage (Originalgröße in Anhang 11)	53
Abbildung 5-25: Foto der Anlage im Endzustand.....	54
Abbildung 6-1: Benutzeroberfläche der App (Automatikmodus).....	57
Abbildung 6-2: Abfrage zum Beenden des Automatikmodus	58
Abbildung 6-3: Benutzeroberfläche der App (manueller Modus).....	59
Abbildung 6-4: Vereinfachtes R&I offen.....	60
Abbildung 6-5: Vereinfachtes R&I geschlossen	60
Abbildung 6-6: Hinweis zur Messwertspeicherung.....	61
Abbildung 6-7: MATLAB-Code: Plot-Funktion, automatische Skalierung	64
Abbildung 6-8: MATLAB-Code: Messwertspeicherung	64
Abbildung 6-9: Beispiel-Code zur Erstellung des LabJack-Objektes in MATLAB.....	66
Abbildung 6-10: Beispiel-Code zur Kommunikation mit dem LJTick-DAC.....	66
Abbildung 6-11: App-Code: Aktualisierung der Anzeigen der Benutzeroberfläche.....	66
Abbildung 6-12: MATLAB-Code: Pumpensteuerung.....	67
Abbildung 6-13: MATLAB-Code: Messwernerfassung Füllstand.....	68
Abbildung 6-14: MATLAB-Code: Mindestfüllstand	69
Abbildung 6-15: MATLAB-Code Messwernerfassung Pumpenleistung.....	70
Abbildung 6-16: MATLAB-Code: Messwernerfassung Volumenstrom	70
Abbildung 6-17: MATLAB-Code: Berechnung Volumenstrom der Turbine.....	71
Abbildung 6-18: Diagramm Pumpenleistung: Volumenstrom in Abhängigkeit des Stromes73	
Abbildung 6-19: R&I der umgebauten Anlage (Originalgröße in Anhang 11)	74
Abbildung 6-20: MATLAB: Code für Fernsteuerzugriff durch ein Smart Grid	76
Abbildung 7-1: MATLAB-Code: Füllstandabhängige Pumpenabschaltung.....	84
Abbildung 7-2: Spinner zur Einstellung der Stromaufnahme der Pumpen	85

Abbildung 7-3: MATLAB-Code: Impulszählung/ Volumenstromberechnung	86
Abbildung 7-4: Beispiel: App-Packaging.....	87
Abbildung 7-5: MATLAB App-Browser.....	87
Abbildung 8-1: Messwertauswertung eines vollständigen Versuchsdurchlaufs.....	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Erklärung: Arten von Regelleistung.....	2
Tabelle 3-1: Vergleich Pumpspeicherkonzepte.....	15
Tabelle 5-1: Leistungsdaten der Turbinen-Generator-Baugruppe.....	21
Tabelle 5-2: Übersicht der Werte zur Berechnung der erforderlichen Mindestwandstärke.....	38
Tabelle 5-3: Voraussichtliche Lastwechselzahlen des Behälters	41
Tabelle 5-4: Kumulierte Lastwechselzahlen in den folgenden Jahren.....	41
Tabelle 5-5: Erweiterte Tabelle Leistungsdaten der Turbine	50

Formelverzeichnis

(1) Potentielle Energie	5
(2) Turbinenleistung	5
(3) Pumpenleistung	5
(4) (Speicher-)Kapazität	5
(5) Totaler Turbinenwirkungsgrad	5
(6) Totaler Pumpenwirkungsgrad	5
(7) Staudruck	6
(8) Hydrostatischer Druck	11
(9) Speicherkapazität Lageenergiespeicher	12
(10) Ideales Gasgesetz	25
(11) Druckverlust in Rohrleitungen	30
(12) Minimale Wandstärke	38
(13) Ohm'sches Gesetz (umgestellt)	50
(14) Ankerstrom	50
(15) Kreissegmentfläche	71

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen deutsches/ lateinisches

Alphabet

A	Fläche	[m ²]
a	spezifische Schaufearbeit	[j/kg]
B	Breite	[m]
BS	Beruhigungsstrecke	[m]
c	absolute Geschwindigkeit	[m/s]
c ₁	Zuschlag für Wanddickenunterschreitung	[mm]
c ₂	Abnutzungszuschlag	[mm]
d	Durchmesser	[m]
D	Durchmesser	[m]
E	Energie	[J]
g	Gravitation/ Erdbeschl.	[m/s ²]
H	Höhe/ Fallhöhe	[m]
I	Stromstärke	[A]
K	Speicherkapazität	[Wh]
K	Festigkeitskennwert	[MPa]
L	Länge	[m]
M	Masse	[kg]
ṁ	Massenstrom	[kg/s]
n	Anzahl	[/]
p	Druck	[bar]
p'	Prüfdruck	[bar]
P	Leistung	[W]
PS	Betriebsüberdruck	[bar]
r	Radius	[m]
R	elektr. Widerstand	[Ω]
s	Wandstärke	[m]
S	Sicherheitsbeiwert	[/]
Sp	Schwerpunkt	[/]
t	Zeit	[s]
T	Zeitintervall	[s]
T	Tiefe	[m]
U	Umfang	[m]
U	Spannung	[V]
u	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
v	Schweißnahtfaktor	[/]
V	Volumen	[m ³]
ṽ	Volumenstrom	[l/min]
y	spezifische Strömungsarbeit	[J/kg]
z	Höhenkoordinate	[m]

Abkürzungen und Indizes

aus	Austritt/ Auslauf
a/ außen	außen
A	Anker(-strom)
bP	befähigte Person
BE	Buoyant Energy
Beflg	Befüllung

BetrSichV

BWS	Berwerkspeicher
DB	Druckbehälter
DC	„direct current“ (engl.) Gleichstrom
DGRL	Druckgeräterichtlinie
ein	Eintritt/ Einlauf
el	elektrisch
Fels	Felsen
FT	(Rohr-) Formteil
Gen	Generator
ges	Gesamt
HK	Hohlkugel
Hub	Hub
hydrost	hydrostatisch
i/ innen	innen
Kol	Kolben
KPS	Kanalpumpspeicher
leer	entleerter Zustand
LES	Lageenergiespeicher
Last	Lastwiderstand
min	Minimum/ mindest-
max	Maximum/ maximal-
NSS	Naturstromspeicher
NT	Netzteil
OB	Oberbecken
OWR	Overwrite-Recht
Pegel	Wasserpegel/ Pegelunterschied
pot	potentiell
PT	Power-Tower
PtG	Power-to-Gas
Pump	Pumpe
RW	Ringwall
SV	Sicherheitsventil
t	total
Turb	Turbine
UB	Unterbecken
UD	User Device
V	Verlust
voll	gefüllter Zustand
ZÜS	Zuständige Überwachungsstelle
Zyl	Zylinder

Formelzeichen griechisches Alphabet

Δ	Delta/ Differenz	[/]
η	eta/ Wirkungsgrad	[%]
ρ	rho/ Dichte	[kg/m ³]

1 Einleitung

Der „Atom-Ausstieg“ ist bereits in vollem Gange und der „Kohle-Ausstieg“ beschlossen, während Windenergie und Photovoltaik immer mehr an Bedeutung gewinnen. 2018 lag der Anteil der Erneuerbaren an der deutschlandweiten Stromerzeugung bereits bei knapp über 40%. Die Hälfte davon, also gut 20%, liefern die Offshore- und derzeit vor allem noch die Onshore-Windenergieanlagen. Doch neben den vielen Vorteilen, die die erneuerbare Stromerzeugung mit sich bringt, birgt sie auch einige Probleme.

Zum einen fehlt es in Deutschland an der notwendigen Infrastruktur, um den Strom vom Ort seiner Erzeugung dorthin zu leiten, wo er verbraucht wird. Das bekannteste Beispiel dafür ist die „Nord-Süd-Trasse“, die den in der Nord- und Ostsee offshore erzeugten Windstrom zu den großen Industriezentren in Süddeutschland Transportieren soll.

Doch selbst wenn der Ausbau der Infrastruktur in den nächsten Jahren an die neuen Gegebenheiten angepasst wird, bleibt ein wesentliches Problem der Stromerzeugung aus Wind und Sonne bestehen: Wind und Sonne liefern die Energie nicht immer dann, wenn sie grade benötigt wird.

Doch warum müssen Stromverbrauch und -erzeugung zueinander passen?

Die Antwort darauf findet sich auf fast jedem Handyladegerät: 50Hz (Hertz). Das ist die Frequenz des Stromnetzes (Europäisches Verbundnetz). Für ein wechselstrombasiertes Übertragungsnetz wie dem europäischen gibt die Frequenz an, wie oft das Vorzeichen der Spannung pro Sekunde wechselt, also wie oft der Strom seine Flussrichtung ändert. Obwohl Wechselstrom grade bei großen Entfernungen höhere Verluste aufweist als Gleichstrom, wird aufgrund der deutlich einfacheren Transformierbarkeit der Spannung weltweit auf Wechselstromübertragung gesetzt. Aber vor allem im Rahmen der Offshore-Windparks kommt immer häufiger Gleichstromübertragung zum Einsatz, da vor allem bei Seekabeln die Nachteile von Wechselstromübertragung noch deutlicher zum Tragen kommen.

Im europäischen Verbundnetz, dem Deutschland angehört, liegt die Frequenz bei 50Hz. Alle Verbraucher und auch alle Erzeuger, die im Netz eingebunden sind, sind auf genau diese Frequenz abgestimmt. Passen Stromerzeugung und Verbrauch nicht zusammen, weicht die Netzfrequenz von den vorgegebenen 50Hz ab. Wird mehr Strom ins Netz eingespeist als ausgespeist, steigt die Frequenz, gleiches gilt vice versa. Dabei sind Schwankungen zwischen 49,95Hz und 50,05Hz völlig normal. Bei stärkeren Abweichungen kann es zum kompletten Netzausfall (Blackout) kommen.

Um die Frequenz stabil zu halten, wird Regelleistung eingesetzt. Dabei unterscheidet man zwischen Primär-, Sekundär und Minutenreserveleistung (vgl. Abbildung 1-1 und Tabelle 1-1).

Aktivierung Regelleistung



Abbildung 1-1: Arten von Regelleistung

Quelle: <http://suedvolt.de/regelenergie/>

Die in Deutschland aktuell installierte Regelleistung kann aber nur einen Bruchteil der Gesamtleistung abfedern. Noch ist das kein so großes Problem, da der Großteil der Stromversorgung (vor allem die Grundlast) immer noch über Großkraftwerke abgedeckt wird. Doch die Zunahme erneuerbarer Energien macht es immer schwieriger, die Netzfrequenz stabil zu halten, sodass in den vergangenen Jahren immer häufiger Photovoltaik- und

Windenergieanlagen abgeschaltet werden mussten, da ihre Leistung vom Netz nicht mehr aufgenommen werden konnte.

Tabelle 1-1: Erklärung: Arten von Regelleistung

	Primärregelleistung	Sekundärregelleistung	Minutenreserveleistung
Aktivierungszeit	innerhalb 30 s	innerhalb 5 min	innerhalb 15 min
Bereitstellung	30 s – 5 min	5 min – 15 min	15 min – 1h
Ausschreibungszeitraum	Wöchentlich	Täglich	Täglich
Vergütung	Ein Preis für Leistung & Arbeit	Leistungs- & Arbeitspreis	Leistungs- & Arbeitspreis
Zugriff/Abruf	Automatisiert frequenzabhängig, eigenständig	Automatisch über ÜNB	Automatisch oder manuell über ÜNB
Zeitscheiben	-	6x 4h-Blöcke	6x 4h-Blöcke
Mindestangebot	1 MW	1 MW	1 MW
Richtung	Positiv und negativ	Positiv und/oder negativ	Positiv und/oder negativ
Besicherungspflicht	Ja	Ja	Nein

Quelle: <http://suedvolt.de/regelenergie/>

Für die Zwischenspeicherung von Strom gibt es unterschiedliche Technologien. Unter anderem auch Pumpspeicher, mit denen sich diese Arbeit befasst.

Neben den Pumpspeichern gibt es vor allem zwei weitere Technologien, die häufig in Bezug auf die Energiewende genannt werden. Aus diesem Grund sollen diese hier kurz vorgestellt werden.

Batteriespeicher

Batteriespeicher arbeiten im Grunde wie haushaltsübliche Akkus (kurz für Akkumulator). Allerdings werden hier je nach benötigter Leistung und Kapazität mehrere (bis hin zu einigen tausend) dieser Batterien, beziehungsweise Akkus, zusammengeschaltet.

- Vorteile:
- schnelles Ansprechverhalten
 - sehr variabel in Bezug auf Kombination von Leistung und Kapazität
 - Wirkungsgrade nahe 100%

- Nachteile:
- geringe Leistungsdichte
 - schlechtes Kosten/Kapazitätsverhältnis

Power-to-Gas

Anders als bei den Batteriespeichern ist das Power-to-Gas-Konzept etwas umfangreicher und komplizierter. Kurz gesagt, geht es um die Umwandlung von Strom in Gas.

Der erste Schritt ist dabei die Wasserelektrolyse, bei der aus Wasser (H₂O) Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) gewonnen werden. Der dabei entstehende Wasserstoff kann bis zu einem gewissen Prozentsatz (maximal 10%) problemlos direkt in das deutsche Erdgasnetz eingespeist werden. Im zweiten Schritt wird dann bei der Methanisierung aus dem hergestellten Wasserstoff und unter Verwendung von zusätzlichem Kohlendioxid (CO₂) Methan (CH₄) gewonnen. Dieser zweite Schritt ist technisch aufwendiger und damit kostenintensiver als der erste, weshalb er nicht immer Anwendung findet. Da Methan der Grundbestandteil von Erdgas ist, kann dieses künstlich erzeugte Methan ohne Probleme in das Gasnetz eingespeist werden. Das Gasnetz dient bei dieser Methode als Speicher, da es sich durch seine großflächige Vernetzung und die darin vorgesehenen Speicher ideal als solcher eignet.

- Vorteile:
- Speicher vorhanden und sehr gut ausgebaut
 - hohe Energiedichte des Speichermediums
 - Ergänzung der Infrastruktur und örtliche Entkopplung von Ein- und Ausspeicherung

- Nachteil:
- schlechte Wirkungsgrade zwischen 20% und 30%

Beide Technologien haben signifikante Vorteile aber auch gravierende Nachteile. Pumpspeicher vereinen die wesentlichen Vorteile beider Technologien, weisen aber eigene charakteristische Nachteile auf. Vor- und Nachteile von Pumpspeichern differieren dabei je nach Konzept und, bedingt durch die physikalischen Grundlagen, auch je nach den lokalen Begebenheiten der einzelnen Pumpspeicher.

2 Aufgabenstellung

Aufgabe dieser Masterthesis ist es, für ein vorhandenes Pumpspeichermodell in MATLAB Steuersoftware zu programmieren und das Modell anlagentechnisch soweit zu optimieren, dass es für eine Integration in ein Smart Grid geeignet ist.

Die Steuersoftware soll dabei eine benutzerfreundliche Oberfläche beinhalten, die alle relevanten Parameter wiedergibt. Zusätzlich sollen in der Software die notwendigen Schnittstellen für die spätere Integration in ein Smart Grid vorgesehen werden.

Das Modell soll soweit anlagentechnisch optimiert werden, dass bei einem späteren Betrieb innerhalb eines Smart Grids Störungen durch Hardwarekomponenten weitestgehend vermieden werden.

3 Pumpspeicher (Stand der Technik)

Pumpspeicher speichern Strom zumeist in Form von potentieller Energie des Wassers. Dabei sind die Energiedichte, die Leistung und der Wirkungsgrad direkt oder indirekt von der Höhendifferenz zwischen unterem und oberem Becken abhängig.

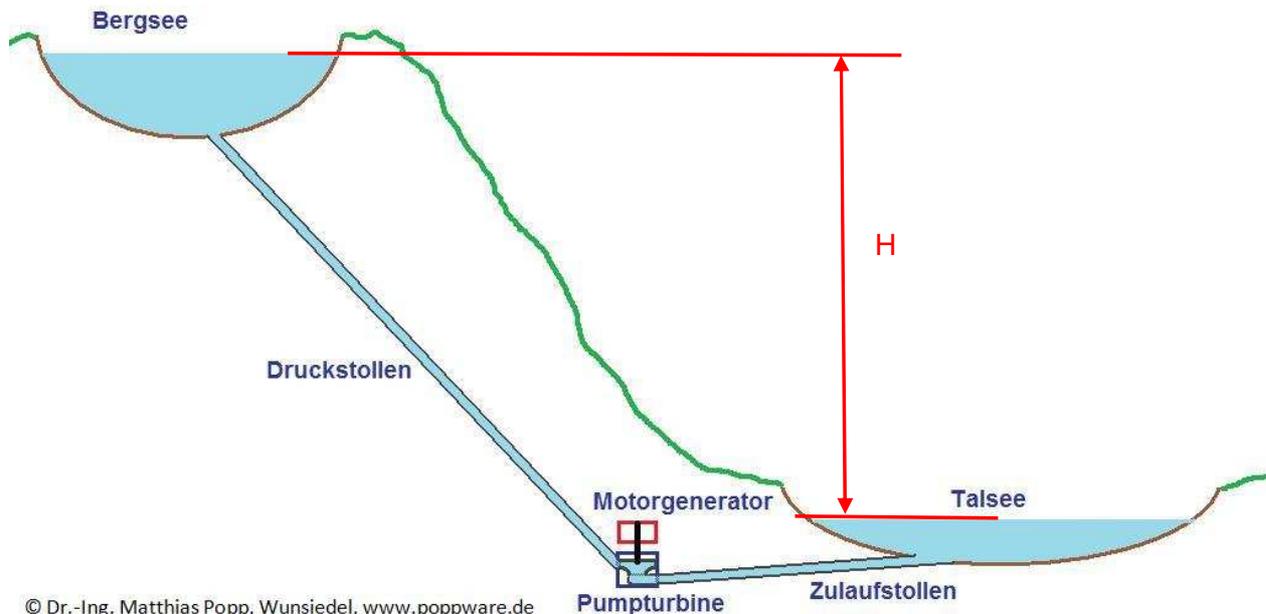


Abbildung 3-1: Modell Pumpspeicher

Quelle: <http://www.poppware.de/PSP/01-Funktionsprinzip.htm>

Für die vereinfachte Bewertung von Pumpspeicherwerten reichen wenige Zahlen aus. Dazu gehören vor allem die Leistung, der Wirkungsgrad und die Kapazität der Speicher. Diese können wiederum anhand weniger Formeln berechnet werden.

$$E_{pot} = m * g * H \quad (1)$$

$$P_{Turb} = \dot{m} * g * H * \eta_{Turb} \quad (2)$$

$$P_{Pump} = \dot{m} * g * H * \frac{1}{\eta_{Pump}} \quad (3)$$

$$K = E_{pot} * \eta_{Turb} = m * g * H * \eta_{Turb} \quad (4)$$

$$\eta_{ges} = \eta_{Turb} * \eta_{Pump}$$

$$\eta_{t,Turb} = \frac{a}{y + 0,5 * (c_{aus}^2 - c_{ein}^2) + g * (z_{aus} - z_{ein})} \quad (5)$$

$$\eta_{t,Pump} = \frac{y + \frac{1}{2} * (c_{aus}^2 - c_{ein}^2) + g * (z_{aus} - z_{ein})}{a} \quad (6)$$

Die Formeln (5) und (6) bilden die totalen Wirkungsgrade von Pumpen und Turbinen. Die Betrachtung der totalen Wirkungsgrade ist nur eine von mehreren Möglichkeiten, die Effizienz

von Pumpen und Turbinen zu bewerten. Im totalen Wirkungsgrad wird der Prozess in der Turbine vollständig betrachtet. Dabei geht es vor allem um die spezifische Schaufelarbeit a und die spezifische Strömungsarbeit y . Die Arbeit, die nicht übertragen werden kann, ist dementsprechend der Verlust (Dissipation) des Prozesses. Die Änderung der potentiellen und kinetischen Energie, die durch die beiden in Klammern gesetzten Differenzen betrachtet wird, dient dazu, die Unterschiede von Austritt und Eintritt in die Turbine beziehungsweise Pumpe darzustellen. Für die einfachste Betrachtung nimmt man an, dass die Strömung an Eintritt und Austritt die gleichen Umgebungsbedingungen aufweist. Die Strömung gewinnt also weder an Geschwindigkeit noch an geodätischer Höhe. Damit ließe sich die Gleichung zu

$$\eta_{t,Turb} = \frac{a}{y} \text{ bzw. } \eta_{t;pump} = \frac{y}{a}$$

vereinfachen. Somit wird deutlich, dass der totale Wirkungsgrad das Umsetzungsverhältnis von Schaufelarbeit in Strömungsarbeit und umgekehrt wiedergibt. Dabei werden keine mechanischen oder elektrischen Wandlungsverluste innerhalb der Maschinen oder in der dazugehörigen Elektronik betrachtet (vgl. Quelle [40]). Zur Betrachtung von Pumpspeicherkraftwerken sind diese Wirkungsgrade nur bedingt geeignet, da für diese Anlagen die Gesamtwirkungsgrade mit den elektrischen und mechanischen Verlusten von Bedeutung sind. Wie an diesen Gleichungen deutlich wird, ist die Betrachtung von Turbinen und Pumpen im Einzelnen deutlich aufwändiger und soll deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vertieft werden.

Die Wirkungsgrade hängen folglich maßgeblich an der Fertigung der Schaufeln, die möglichst genau zu der vorherrschenden Strömung passen müssen. Je unstabiler die Strömung ist, desto schlechter wird im Mittel auch der Wirkungsgrad.

Die Energie einer Strömung besteht maßgeblich aus zwei Komponenten: Der Strömungsgeschwindigkeit und dem Druck. Der Druck beinhaltet dabei eine Art Beschleunigungspotential, auch Staudruck genannt, mit dessen Hilfe berechnet werden kann, wie viel Druck beim Aufstauen eines bewegten Fluides entstehen würde oder wie schnell ein mit Druck beaufschlagtes Fluid strömen würde, wenn es drucklos wäre.

$$p_{Stau} = \frac{\rho}{2} * u^2 \tag{7}$$

$$u = \sqrt{2 * \frac{p_{Stau}}{\rho}}$$

Die Fließ- oder Strömungsgeschwindigkeit hat auch einen maßgeblichen Einfluss auf die Reibungsverluste in den Rohrleitungen zur Turbine (vgl. Formel (11)). Daher ist es für die Effizienz von Pumpspeichern günstiger, die Strömungsgeschwindigkeit erst in der Turbine zu erhöhen und die Leitungsquerschnitte bis dahin so groß zu dimensionieren, dass die Strömungsgeschwindigkeiten und die damit verbundenen Verluste gering bleiben. Die in der Strömung enthaltene Energie bleibt dabei annähernd die gleiche, nur dass der hydrostatische Druck der Wassersäule erst vor der Turbine in nutzbare kinetische Energie des Wassers umgewandelt wird.

Die Kapazität hängt maßgeblich von der Höhendifferenz zwischen oberem und unterem Becken, auch Fallhöhe (vgl. Abbildung 3-1 „H“) genannt, und dem Volumen des oberen Beckens ab. Für einige der folgend vorgestellten Konzepte kann Formel (4) aufgrund abweichender Grundprinzipien angepasst werden.

Die maximale Leistungsaufnahme und Leistungsabgabe eines Pumpspeichers entspricht der Leistung der installierten Pumpen und Turbinen.

3.1 Pumpspeichervarianten

Für Pumpspeicher gibt es diverse Konzepte, die sich mehr oder weniger von den „herkömmlichen Pumpspeichern“ (vgl. Abbildung 3-1) unterscheiden. Um diese Unterschiede und die damit verbundenen Vor- und Nachteile aufzuzeigen, soll zunächst das herkömmliche Pumpspeicherkonzept genauer erläutert werden.

3.1.1 Herkömmliche Pumpspeicher

Mit herkömmlichen Pumpspeichern ist hier das Konzept gemeint, welches in Deutschland schon seit Anfang des 20. Jahrhunderts zum Einsatz kommt. Dabei wird die natürliche Struktur der Landschaft und der Höhenunterschied zwischen zwei Gewässern (Seen oder Flüssen) oder innerhalb eines Gewässers genutzt. Zwischen höher und tiefer gelegenem Gewässerteil wird, sofern nicht vorhanden, eine Verbindung hergestellt. Diese Verbindung wird am tiefsten Punkt mit einem oder mehreren Maschinensätzen (Pumpe und Turbine/Pumpturbine) versehen, sodass das Wasser nur über die Pumpe oder Turbine zwischen den beiden Gewässern strömen kann. Um Energie beziehungsweise Strom einzuspeichern, wird Wasser vom unteren in das obere Gewässer gepumpt (vgl. Abbildung 3-1, unteres Gewässer = Talsee; oberes Gewässer = Bergsee). Zur Ausspeicherung wird dieser Prozess umgekehrt und das Wasser strömt durch die Turbine wieder nach unten.

Die meisten Pumpspeicher in Deutschland wurden in der Vergangenheit dort gebaut, wo die Wasserkraft bereits genutzt wird oder genutzt werden sollte. An Stauseen, Talsperren und anderen Wasserkraftwerken wurden die Speicherkapazitäten durch zusätzliche Gewässer erweitert oder die vorhandenen Laufwasserkraftwerke durch Pumpen zur Speicherung ergänzt. Das größte und modernste Beispiel dafür ist das „Pumpspeicherwerk Goldisthal“ in Thüringen. Es wurde Anfang des 21. Jahrhunderts fertiggestellt und hat eine Speicherkapazität von 8,5GWh bei einer maximalen Turbinenleistung von circa 1GW. Dieses Pumpspeicherwerk arbeitet somit in Größenordnungen von großen Kohle- oder Atomkraftwerken.

Allerdings sind diese Größenordnungen in Deutschland nicht die Regel für Pumpspeicher. Der Großteil der Pumpspeicherwerke bewegt sich in einem Leistungsbereich von 50 bis 200MW bei einer Kapazität von 500 bis 1000 MWh. Bis auf wenige Ausnahmen wurden die meisten dieser Anlagen vor 1980 in Betrieb genommen, die ältesten sogar vor Beginn des 2. Weltkriegs.

Die Wirkungsgrade moderner Pumpspeicherwerke liegen bei circa 80% für den Gesamtprozess, der sich wiederum aus dem Produkt von Pumpen- und Turbinenwirkungsgrad zusammensetzt. Davon ausgehend, dass Pumpen und Turbinen aufgrund ihrer ähnlichen Arbeitsweise ähnliche Wirkungsgrade besitzen, soll in dieser Arbeit davon ausgegangen werden, dass die Wirkungsgrade, sofern nicht bekannt, wie folgt berechnet werden können:

$$\eta_{Pump} = \eta_{Turb} = \sqrt{\eta_{ges}} = \sqrt{0,8} \cong 0,9$$

Der Pumpenwirkungsgrad an sich spielt für die Betrachtung von Pumpspeichern keine große Rolle, da die wichtigste Aussage, die über ihn getroffen werden kann, im Gesamtwirkungsgrad enthalten ist: Wie effizient der Speicher arbeitet.

Der Turbinenwirkungsgrad hingegen hat auch für sich eine große Bedeutung. Nur über ihn lässt sich die elektrische Kapazität eines Pumpspeichers berechnen. Der Turbinenwirkungsgrad ist der Umrechnungsfaktor von gespeicherter oder speicherbarer potentieller Energie in elektrische Energie. Er kann auch als Ausspeicherwirkungsgrad bezeichnet werden. Von ihm sind maßgeblich die notwendigen Dimensionen des Speichers abhängig und somit auch die wirtschaftliche und technische Umsetzbarkeit.

Mit Blick auf die Energiewende hat vor allem dieser Ausspeicherwirkungsgrad eine große Bedeutung. Denn erneuerbare Energie wird, lässt man den Ressourcenaufwand für den Bau der Anlagen außen vor, ohne dafür endliche Rohstoffe zu verbrauchen erzeugt, entsteht dafür aber unregelmäßig. Es kann also sein, dass an einem Tag ein Vielfaches der benötigten Energie erzeugt wird, während an einem anderen Tag nur ein Bruchteil aus Wind und Sonne gewonnen werden kann. Speicher werden also nicht mehr nur genutzt, um die Netzbelastung auszugleichen,

sondern müssen auch dazu genutzt werden, eine durchgehende Energieversorgung sicherzustellen.

Ein guter Speicherwirkungsgrad ist daher aus zwei Gründen wichtig. Zum einen reduziert ein guter Ausspeicherwirkungsgrad die notwendige physikalische Kapazität, also die Ausmaße, notwendiger Speicher. Außerdem reduziert ein guter Gesamtwirkungsgrad der Speicher die Gesamtleistung, die zur Versorgung notwendig ist. Je höher der Speicherwirkungsgrad ist, desto besser ist das Verhältnis von eingespeicherter zu ausgespeicherter Energie und desto weniger Leistung muss folglich installiert werden, um diese Speicher neben der Versorgung zu füllen.

Es muss ein Kompromiss in Bezug auf Umwelteinflüsse gefunden werden. Herkömmliche Pumpspeicher sind durch die Verwendung von Wasser als Speichermedium an zwei wesentliche Faktoren gebunden: Höhenunterschiede und ausreichend Platz. Große Höhenunterschiede gibt es vor allem in den Gebirgsregionen im Süden Deutschlands. Dort ist aber auch die verfügbare nutzbare Fläche am geringsten, da große Seen nur selten an steilen Berghängen vorkommen und die Täler zwischen den Bergen häufig besiedelt sind.

3.1.2 Kanalpumpspeicher (H. Degenhart, T. Schomerus, D. Schulz, Quelle [1])

Das Konzept der Kanalpumpspeicher orientiert sich an der Bauweise herkömmlicher Pumpspeicherwerke. Doch statt zur Energiegewinnung gestaute Gewässer zu nutzen, werden bei diesem Konzept Staustufen, Schleusen und Wehre genutzt, die ursprünglich für die Binnenschifffahrt errichtet wurden. Die Idee, die vorhandenen Bauwerke energetisch nutzbar zu machen, ist grundsätzlich positiv, birgt aber viele Probleme mit sich, die sich nicht ohne weiteres lösen lassen.

Die Bauwerke und auch die notwendige Infrastruktur sind weitestgehend vorhanden. Außerdem handelt es sich um viele kleine dezentrale Anlagen und die Beeinflussung der Natur ist minimal. Da die Gewässer bereits aufgestaut werden, sind weitere Eingriffe in die Landschaft überflüssig. Wie anfangs erwähnt sind die Wirkungsgrade von der Höhendifferenz abhängig und diese ist bei Schleusen und ähnlichen Bauwerken verhältnismäßig gering (ca. 10-50m). Auch die mögliche Turbinen- und Pumpenleistung ist eher gering, da die Bauwerke sehr klein sind und die möglichen Massenströme sehr begrenzt ausfallen. Außerdem steht der Einsatz der Bauwerke zur Energiegewinnung im Konflikt mit dem Einsatz für die Binnenschifffahrt, da Strom nicht unbedingt dann gebraucht wird, wenn grade ein Schiff die Schleuse passiert. Auch die Kapazität eines solchen Pumpspeichers würde sehr gering ausfallen. Ein Fluss mit zehn Metern Breite und 100km Länge könnte durch einen Pegelunterschied von einem halben Meter (entspricht $H=0,5m$) $500.000m^3$ Wasser aufnehmen.

$$V_{KPS,OB} = L * B * H = 10m * 100.000m * 0,5m = 500.000m^3$$

Bei einer Fallhöhe von 20m und unter Annahme eines Turbinenwirkungsgrades von 85% (optimistische Bewertung) entspräche das einer Kapazität von

$$K_{KPS} = V_{KPS,OB} * \rho_{Wasser} * g * H * \eta_{Turb}$$

$$K_{KPS} = 500.000m^3 * 1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 20m * 0,85 = 83,39 GJ = 23,16 MWh$$

also knapp 0,27% der Kapazität des Pumpspeicherwerkes Goldisthal.

Allein die Anzahl an Kanalpumpspeichern (ca. 370 Stück), die es bräuchte um ein großes Pumpspeicherwerk zu ersetzen zeigt, dass dieses Konzept trotz seiner geringen Umwelteinflüsse kaum umsetzbar scheint.

Die Idee, vorhandene Infrastruktur nutzbar zu machen, ist wirtschaftlich und technisch sehr effizient. Gleichzeitig birgt die Idee ein hohes Konfliktpotenzial, da die Infrastruktur bei ihrer Entstehung nicht für diese doppelte Nutzung ausgelegt wurde.

3.1.3 Unterflur-Pumpspeicherwerk/ Bergwerkspeicher (Quelle [2])

Wie Kanalpumpspeicher unterscheiden sich auch die Unterflur-Pumpspeicher nicht wesentlich von herkömmlichen Pumpspeicherwerken. Der größte Unterschied besteht darin, dass die Pumpspeicher unterirdisch angelegt werden. Es sollen dafür aber keine neuen Schächte ausgehoben, sondern vielmehr die zum Großteil bereits verlassenen Kohle- und Erzbergwerke weiter genutzt werden. Die großen Kavernen und Hauptstollen der Bergwerke dienen dabei als unteres Becken, während auf dem ehemaligen Zechengelände das obere Becken künstlich errichtet wird. Die ursprünglichen Zugangsschächte zum Bergwerk dienen als Verbindung zwischen den beiden Becken und müssten entsprechend ausgerüstet werden. Am untersten Punkt des Zugangsschachtes befindet sich das Maschinenhaus oder besser die Maschinenkaverne. Sie bildet den Zugang in das Innere des Bergwerks und damit die Verdingung der beiden Becken. Die vorhandenen Abluftschächte der Bergwerke können dazu genutzt werden, das untere Becken gegen die Atmosphäre zu öffnen, um die Druckdifferenz der Wassersäule nutzbar zu machen.

Die Umnutzung stillgelegter Bergwerke bietet den großen Vorteil, dass diese ohnehin in Zukunft überwacht werden müssten, da die langfristigen Auswirkungen nicht abzusehen sind. Aber auch die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur ist von Vorteil, da so weitere Eingriffe in die Natur zur Errichtung eines Pumpspeichers vermieden werden.

Allerdings bietet dieses Konzept nicht nur Vorteile, so müssten die zur Wasserspeicherung genutzten Stollen und Kavernen zum Schutz vor und zum Schutz des Grundwassers vollständig ausgekleidet und abgedichtet werden. Einspülungen von Geröll und Sedimenten könnten Pumpen und Turbinen beschädigen und würden langfristig die Speicher zusetzen. Austretendes Wasser könnte das Grundwasser verunreinigen oder die Bergwerke weiter ausspülen. Das wiederum könnte verheerende Auswirkungen auf die Umgebung des Bergwerkes haben.

Trotzdem bieten die alten Stollen gute Möglichkeiten für den Einsatz als Pumpspeicher. Die Volumen alter Kohlebergwerke belaufen sich meist auf mehrere Millionen Kubikmeter. Diese können zwar bei weitem nicht vollständig genutzt werden, aber man geht davon aus, dass sich immerhin 500.000m³ bis 1.000.000m³ pro Bergwerk nutzen lassen. Zusammen mit den enormen Fallhöhen von 1.000m bis zu 2.000m ergäbe sich pro genutztem Bergwerk eine Kapazität von:

$$K = \eta_{Ges} * m_{Wasser} * g * H$$

$$K_{BWS} = 0,9 * \left(750.000m^3 * 1000 \frac{kg}{m^3} \right) * 9,81 \frac{m}{s^2} * 1500m = 9,93 TJ = 2,76 GWh$$

Das entspricht knapp einem Drittel der Kapazität vom Pumpspeicherwerk Goldisthal. Die maximale Leistung der Anlage wird in diesem Fall durch die hohen Fallhöhen und dadurch sehr hohen Drücke und die verhältnismäßig enge Umgebungen im Zugangstollen begrenzt. Während in Goldisthal in der Spitze über 100m³/s Wasser durch die Turbinen strömen, wären in einem Unterflur-Pumpspeicher wahrscheinlich nur 25% bis 30% dieses Volumenstroms möglich. Das würde einer Turbinenleistung von

$$P_{Turb} = \eta_{Turb} * \dot{m}_{Wasser} * g * H$$

$$P_{Turb} = 0,9 * \left(100 \frac{m^3}{s} * 1000 \frac{kg}{m^3} * 0,275 \right) * 9,81 \frac{m}{s^2} * 1500m = 364,2 MW$$

Entsprechen, also rund einem Drittel der Leistung von Goldisthal. Um diese Speicherkapazität auch im oberen Becken auffangen zu können, würde ein Becken von 300m Länge und 250m Breite, so wie 10m Tiefe ausreichen. Ein solches Becken sollte auf jedes Zechengelände passen, unter dem ein Bergwerk der angegebenen Größe liegt.

Alternativ verfügen die meisten Bergwerke über mehrere Stollen in unterschiedlichen Höhen, sodass auch eine hydraulische Verschaltung im Bergwerk denkbar wäre. Es könnten auch unterschiedliche Leistungsstufen im gleichen Pumpspeicher untergebracht werden, die aus dem gleichen Oberbecken gespeist werden.

Ein Unterflur-Pumpspeicherwerk in der Größe des berechneten Beispiels kann also durchaus mit den Leistungsdaten moderner Pumpspeicher mithalten und wäre, die technische Umsetzbarkeit

vorausgesetzt, dabei wahrscheinlich auch wirtschaftlich. Zudem würden die vorhandenen Bergwerke sinnvoll genutzt und könnten gleichzeitig langfristig überwacht werden. Lediglich die Belastungen des Untergrundes müssen noch geklärt werden, da nicht abzusehen ist, wie sich ein mit Wasser gefülltes Bergwerk verhält.

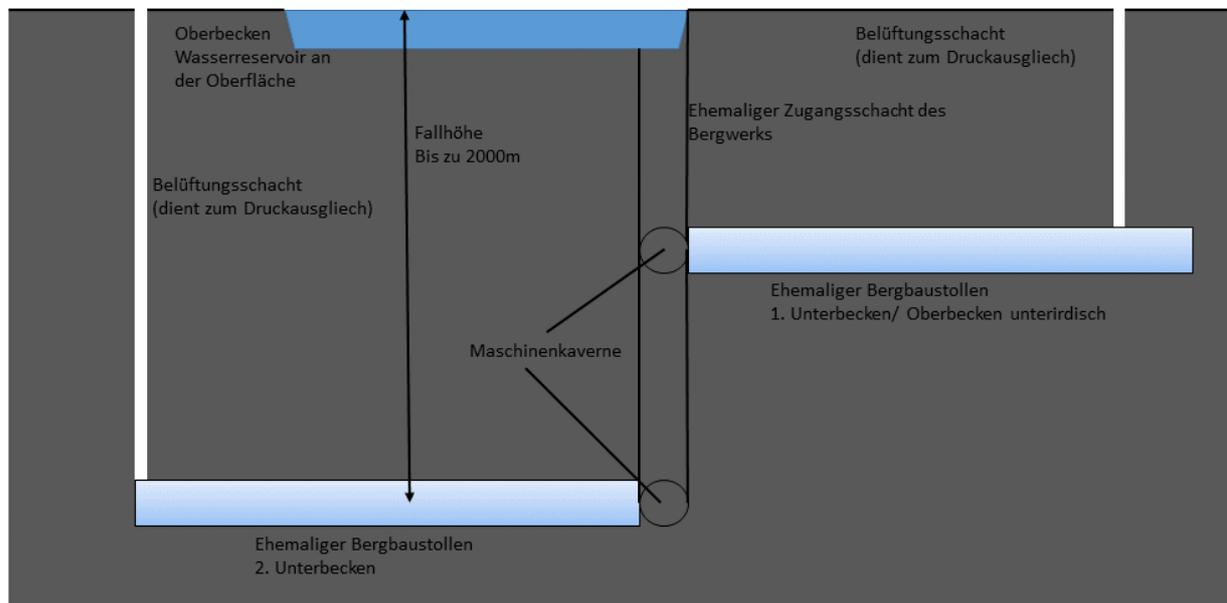


Abbildung 3-2: Skizze Unterflur-Pumpspeicher
Quelle: Eigene Darstellung

3.1.4 Lageenergiespeicher (Heindl Energy, Prof. Dr. E. Heindl, Quelle [29] & [44])

Im Unterschied zum Kanal- und zum Unterflur-Pumpspeicher weicht das Konzept des Lageenergiespeichers deutlich vom Prinzip herkömmlicher Pumpspeicher ab. Der grundlegende Unterschied besteht darin, dass das Wasser nur noch das Trägermedium der Energie ist, während die eigentliche Speicherung anders erfolgt.

Statt die potentielle Energie des Wassers zu nutzen, soll bei einem Lageenergiespeicher die potentielle Energie eines ganzen Berges oder großen Felsens, der mittels Wasserdruck angehoben wird genutzt werden.

Die Idee dahinter ist, durch geologische Untersuchungen Felsformationen zu finden, die in sich stabil sind und somit in einem Stück aus der umgebenden Landschaft herausgelöst werden können. Dieser Felsen soll dann ausgesägt und untergraben werden, um ihn anschließend wie einen großen Zylinder anheben zu können. Dazu soll Wasser unter den Zylinder gepumpt werden. Dieses Wasser wird wie in einem herkömmlichen Pumpspeicher durch eine Turbine wieder abgelassen und erzeugt dadurch Strom.

Der große Vorteil dieses Konzeptes ist die hohe Dichte des Gesteins, die das 2,5- bis 3-fache der Dichte von Wasser erreicht. Dadurch kann bei gleichem Volumen ein Vielfaches der Speicherkapazität erreicht werden beziehungsweise wird für die gleiche Speicherkapazität eine deutlich kleinere Anlage benötigt.

Neben diesem großen Vorteil der Energiedichte des Speichers gibt es aber auch einige Probleme und ungelöste Fragen. Zu allererst wäre das Problem der Abdichtung zu nennen. Das Beispiel, das Prof. Dr. Heindl anführt, geht von einem Felsen mit 250m Durchmesser aus. Das würde einen Umfang von

$$U_{LES} = 2 * \pi * r_{LES} = 2 * \pi * 125m = 785,4 m$$

bedeuten. Es müsste also eine Dichtung um den gesamten Ausschnitt gelegt werden, die eine Gesamtlänge von 785m hätte. Gleichzeitig müsste die Dichtung auch den Hub des Felszylinders

aufnehmen können. Dieser wird von Prof. Heindl anhand des Zylinderschwerpunktes (mittig) und der optimalen Speicherkapazität berechnet und ergibt sich zu

$$H_{Hub} = r_{LES}$$

mit

$$H_{LES} = 2 * r_{LES} = d_{LES}$$

Der Zylinder sollte also so hoch wie breit sein und kann dann um die Hälfte seines Durchmessers angehoben werden (vgl. Abbildung 3-3). Werden diese Abmessungsverhältnisse eingehalten, ist beim maximalen Hub des Zylinders der Zylinderschwerpunkt genau auf Höhe der umgebenden Führung. Damit ist ein Herauskippen des Zylinders nicht möglich.

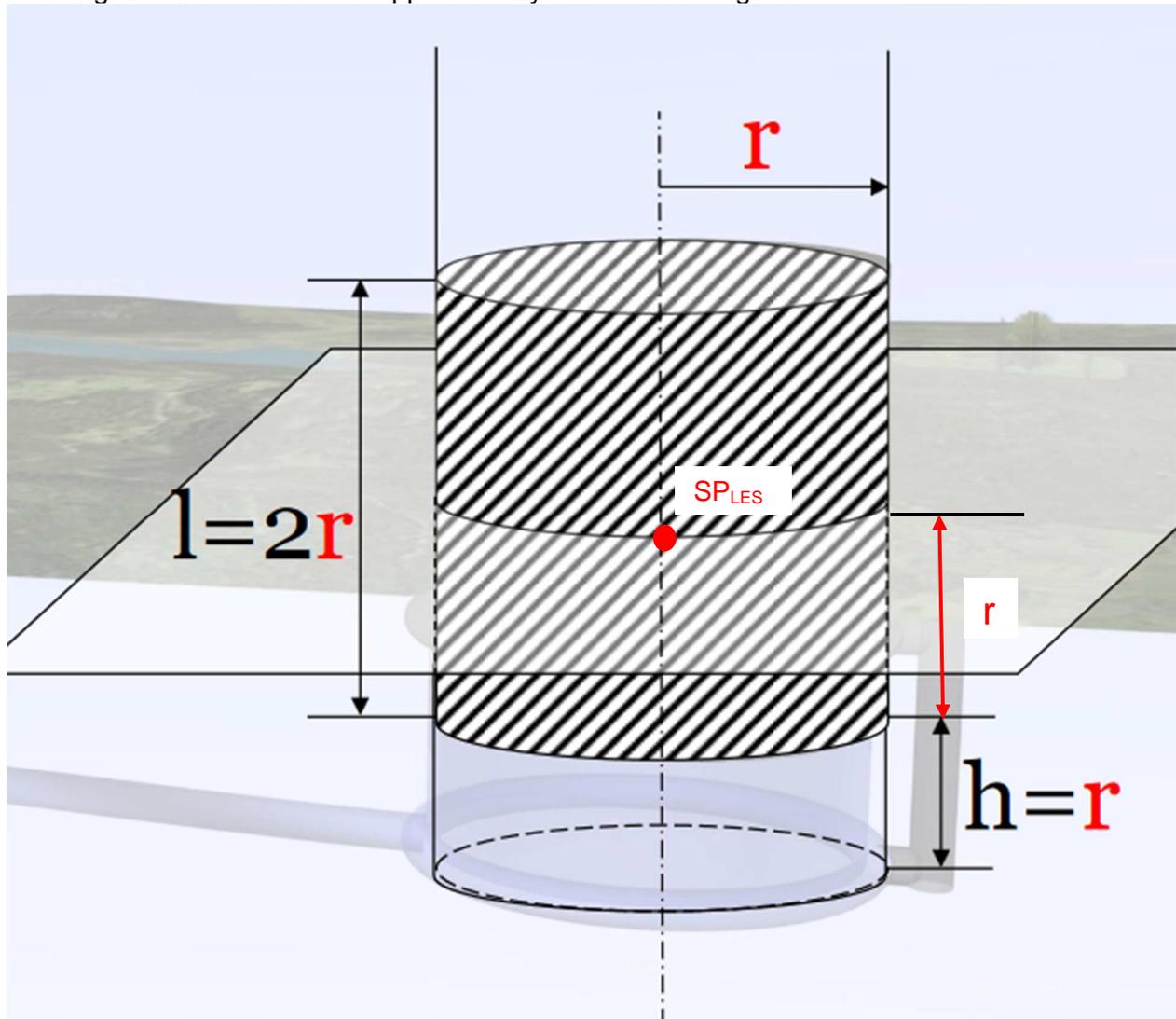


Abbildung 3-3: Skizze Lageenergiespeicher

Quelle: <http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/rincke/Allgemeines/Lageenergiespeicher-Lehrertage-2013.pdf>

An der Dichtung würde sich ein Druck von

$$p_{LES,Dichtung} = \frac{V_{LES} * \rho_{Fels}}{A_{LES}} - p_{hydrost}$$

$$p_{hydrost} = \rho_{Wasser} * g * H; H = r \quad (8)$$

$$p_{LES,Dichtung} = \frac{\pi * r^2 * 2 * r * g * \rho_{Fels}}{\pi * r^2} - \rho_{Wasser} * g * r = (2 * \rho_{Fels} - \rho_{Wasser}) * g * r$$

$$p_{LES,Dichtung} = \left(2 * 2750 \frac{kg}{m^3} - 1000 \frac{kg}{m^3} \right) * 9,81 \frac{m}{s^2} * 125m$$

$$p_{LES,Dichtung} = 5,52 * 10^6 Pa = 55,2bar$$

einstellen. Die Dichtung hätte also nicht nur eine Länge von 785m, sondern müsste auch noch einen Höhenunterschied von 125m ausgleichen und dabei einem Druck von 55bar standhalten. Der Spalt zwischen dem Zylinder und dem umgebenden Gelände ist jedoch nicht die einzige Öffnung. Da ein Fels dieser Größe aus logistischen Gründen an seinem ursprünglichen Ort verbleiben muss, besteht zusätzlich das Problem, das das umgebende Gestein ebenfalls mit einem Druck von mindestens 71bar beaufschlagt wird. Um Wasserverluste und dem damit verbundenen Eintritt von Wasser in das umgebende Gestein vorzubeugen, muss die gesamte Außenhaut des Zylinders abgedichtet werden. Und auch die Oberfläche des Felsens wird bei einer solchen Größe nicht einheitlich sein. Sie muss also genau wie die Umgebung vor Wassereintritt geschützt werden.

Sind diese Probleme gelöst, hätte ein Lageenergiespeicher dieser Größe eine Kapazität von

$$K_{LES} = (E_{pot,Fels} - E_{pot,Wasser}) * \eta_{Turb}$$

$$K_{LES} = \pi * r^2 * 2 * r * \rho_{Fels} * r - \pi * r^2 * r * \rho_{Wasser} * \frac{3}{2} r$$

$$K_{LES} = \left(2 * \rho_{Fels} - \frac{3}{2} * \rho_{Wasser} \right) * \pi * g * r_{LES}^4 * \eta_{Turb}$$

$$K_{LES} = \left(2 * \rho_{Fels} - \frac{3}{2} * \rho_{Wasser} \right) * \pi * g * r_{LES}^4 * \eta_{Turb} \quad (9)$$

$$K_{LES} = \left(2 * 2750 - \frac{3}{2} * 1000 \right) \frac{kg}{m^3} * \pi * 9,81 \frac{m}{s^2} * (125m)^4 * 0,9$$

$$K_{LES} = 2,7087 * 10^{13} J = 7,52 GWh$$

was fast der Kapazität des Pumpspeichers Goldisthal entspricht. Dabei wird von einem Wasserreservoir (unteren Becken) an der Oberfläche der Umgebung ausgegangen. Würde dieses Becken auf Höhe des Freiraums unter dem Felszylinder liegen, wäre die Fallhöhe für die potentielle Energie des Wassers gleich Null, wodurch der zweite Term der Berechnung entfallen würde. Damit ergäbe sich eine Kapazität von

$$K_{LES} = 3,7245 * 10^{13} J = 10,35 GWh$$

Mit einer solchen Zusatzkaverne würde die Speicherkapazität also um mehr als ein Drittel ansteigen.

Im Grunde kann bei einem Lageenergiespeicher die gleiche Maschinenteknik wie in einem herkömmlichen Pumpspeicher eingesetzt werden, weshalb sich auch Wirkungsgrade und Leistungen ähneln. Aus diesem Grund kann diese Art des Speichers trotz seiner Unterschiede als eine Art Pumpspeicher angesehen werden. Für die Umsetzung dieses Konzeptes muss letztendlich ein Kompromiss zwischen technischer Umsetzbarkeit (die mit zunehmender Größe immer weiter abnimmt) und Wirtschaftlichkeit (die mit zunehmender Größe zunimmt) gefunden werden.

Wie bereits aus der Berechnung (vgl. Formel (9)) hervorgeht, ist die Speicherkapazität und die damit verbundene wirtschaftliche Einnahmequelle von der vierten Potenz des Radius abhängig, während die Kosten und technischen Probleme hauptsächlich mit der Oberfläche oder dem Umfang des Felszylinders, also mit der ersten oder zweiten Potenz ansteigen. Die umsetzungskritischen Faktoren des Lageenergiespeicher-Konzeptes sind die Abdichtung des Spaltes und des Gesteins und die Stabilität eines Felsens dieser Größe.

3.1.5 Ringwallspeicher (Dr. Matthias Popp, Quelle [5] & [25])

Ringwallspeicher sind die größten künstlichen Pumpspeicher unter den vorgestellten Konzepten. Vom Aufbau her gleichen sie herkömmlichen Pumpspeichern, mit dem feinen Unterschied, dass die Fallhöhe künstlich erzeugt wird. Dazu wird ein ringförmiges Becken mit circa elf Kilometern Außendurchmesser und sechs Kilometer Innendurchmesser ausgehoben. Der Aushub wird benutzt um auf der entstehenden Mittelinsel einen ringförmigen Wall mit ungefähr 200m Höhe aufzuschütten. Die so entstehenden Becken bilden Ober- und Unterbecken des Pumpspeichers. Die Flächen auf dem Ringwall und auch die Wasseroberfläche des Oberbeckens können zur Aufstellung von Photovoltaik- und Windenergieanlagen genutzt werden (vgl. Abbildung 3-4). Das untere Becken bietet mit seiner großen Wasserfläche einen hohen Freizeitwert, wobei nicht zu vernachlässigen ist, dass der Pegelunterschied bis zu 20m betragen kann. Auch bei sehr langsamer Pegelschwankung ist das für gewerbliche oder freizeithliche Nutzung des Gewässers ein großer Nachteil. Im Oberbecken sind die Pegelschwankungen dementsprechend deutlich stärker, haben aber einen kleinen bis gar keinen Einfluss auf die Umgebung. Nur die Fallhöhe unterliegt dadurch ebenfalls deutlichen Schwankungen. Sie variiert zwischen vollständig gefülltem und vollständig entleertem Speicher um 70m.

Bei einem Pegelunterschied von 50m im Oberbecken und einer mittleren Fallhöhe von 200m ergäbe sich eine Speicherkapazität von

$$K_{RW} = \pi * r^2 * \Delta H_{Pegel} * \rho_{Wasser} * g * H * \eta_{Turb}$$

$$K_{RW} = \pi * (6000m)^2 * 50m * 1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 200m * 0,9 = 9,985 PJ = 2,774 TWh$$

Diese Speicherkapazität würde ungefähr dem 350-fachen des Pumpspeichers Goldisthal entsprechen. Die enormen Abmessungen eines Ringwallspeichers würden schon vor Baubeginn durch etliche Genehmigungen zu diversen Problemen führen. Hinzu kommt, dass für die technische Umsetzbarkeit eines Projektes dieser Größenordnung nur sehr bedingt Erfahrungswerte vorliegen, sich die Realisierbarkeit somit nicht abschätzen lässt.



Abbildung 3-4: Beispiel Ringwallspeicher
Quelle: <http://www.ringwallspeicher.de/>

Ein Ringwallspeicher mit 2,7km Außen- und 2km Innendurchmesser könnte bei gleicher Fallhöhe und Pegelschwankungen von 5m im Ober- und 2m im Unterbecken bereits Speicherkapazitäten in der Größe des Pumpspeichers Goldisthal erreichen.

Das Konzept der Ringwallspeicher stellt in jedem Fall einen großen Eingriff in die Natur dar. Zwar scheinen die von Dr. Matthias Popp angenommenen Abmessungen aus technischer und rechtlicher Sicht sehr schwer umsetzbar zu sein, aber in kleineren Dimensionen (1-3km Außendurchmesser) könnten Ringwallspeicher trotz ihrer dann immer noch enormen Größe eine gute Ergänzung der Speicherkapazität im europäischen Verbundnetz darstellen.

Eine neuere Idee, die mit den politischen Diskussionen um den Braunkohletagebau am Hambacher Forst aufkam, greift dieses Konzept in gewisser Weise mit auf. Durch den Braunkohletagebau wurden bereits riesige Gruben in Deutschland – vor allem in den flacheren Regionen – ausgehoben. Die so entstandenen Becken und der dabei entstandene Aushub könnten zur Errichtung künstlicher Pumpspeicher genutzt werden. Das Becken am Hambacher Forst soll später am tiefsten Punkt rund 400m tief sein, während der gesammelte Aushub („Sophienhöhe“) mit 200m Höhe über der umgebenden Landschaft der größte künstliche Berg Deutschlands ist. Statt neue Ringwallspeicher auszuheben, wäre es dementsprechend eine Überlegung wert, die vorhandenen Gruben aus dem Braunkohletagebau zu Pumpspeichern umzufunktionieren.

3.2 Vergleich der Konzepte und weitere Möglichkeiten

Die Beschreibungen weiterer Pumpspeichervarianten, die als Vergleich in Tabelle 3-1 mit aufgeführt sind, finden sich in „Anhang 7: Weitere Pumpspeicherkonzepte“.

Tabelle 3-1: Vergleich Pumpspeicherkonzepte

Konzept (Erfinder)	Kapazität [MWh]	Leistung [MW]	Gesamt-Wirkungsgrad	durchschnittliche Fallhöhe [m]	bauliche Dimensionen [m ²]	Wirtschaftlichkeit	technische Umsetzbarkeit
Herkömmliche Pumpspeicher	bis 10.000	bis 1.000	80%	min 100 bis zu 2000	mehrere Millionen	bewährt	häufig umgesetzt
Kanalpumpspeicher (Heinrich Degenhart Thomas Schomerus Detlef Schulz)	2 bis 20	<1	~50-70%	10 bis 50	wenige Hundert	nein	gut
Unterflur-Pumpspeicher	500 bis 10.000	bis 1.000	80%	1000 bis 2000	alte Zechengelände	voraussichtlich ja	ungeklärt
Lageenergiespeicher (Prof. Dr. Heindl)	5.000 bis 1.000.000	bis 1.000	>80%	100 bis 500	50.000 bis 1.000.000	voraussichtlich ja	fraglich
Power-Tower (Prof. Dr. Aufleger)	2 bis 50	<1	75%	bis 50	<1000	fraglich	ja
Gravity Power (Jim Fiske)	500 bis 5.000	mehrere Hundert	80%	500 bis 1000	~ 20.000	voraussichtlich ja	ungeklärt
Buoyant Energy (Robert Klar)	1 bis 5	<1	<70%	20	~20.000	nein	fraglich
Hohlkugelspeicher	~18 pro Kugel	1 bis 5 pro Kugel	75 bis 80%	600 bis 800	80 bis 200 Kugeln für 1 Offshore-Windpark	voraussichtlich ja	nach ersten Tests ja
Naturstromspeicher	50 bis 1.000	8 bis 32	80%	min 100	je nach Windpark	ja	ja
Ringwallspeicher (Dr. Popp)	5.000 bis 1.000.000	bis mehrere 1.000	>80%	150 bis 250	20.000.000 bis 400.000.000	voraussichtlich ja	ungeklärt

Quelle: Eigene Darstellung

Jedes der vorgestellten Konzepte weist individuelle Vor- und Nachteile auf. Dabei können nur sehr begrenzt Aussagen darüber getroffen werden, welche Konzepte sich besser zur Umsetzung der Energiewende eignen und welche weniger gut.

Allerdings sollten die Konzepte nicht nur für sich alleine betrachtet werden. Aus der Kombination verschiedener Konzepte könnten sich völlig neue Umsetzungsmöglichkeiten ergeben und Nachteile einzelner Konzepte könnten umgangen oder Vorteile noch weiter ausgebaut werden. Ein Beispiel dafür wäre die Kombination des Bergwerkspeichers mit einem Power-Tower oder Gravity Power. Statt einen herkömmlichen Pumpspeicher in ein altes Bergwerk zu bauen, könnte der Zugangsschacht als Zylinder genutzt werden, in den dann ein Kolben eingesetzt wird. Die unteren Stollen könnten als Reservoir (unteres Becken) dienen und so die Speicherkapazität des Power-Tower (Lageenergiespeicher) erhöhen (vgl. Kapitel 2.1.3).

Beispielhaft soll von einem Zugangsschacht ausgegangen werden, der nach der Überarbeitung einen Innendurchmesser von zehn Metern aufweist und eine Tiefe von 1500m besitzt.

$$K_{BWS-PT} = \pi * r_{Schacht}^2 * \frac{H}{2} * \rho_{Beton} * g * \frac{H}{2}$$

$$K_{BWS-PT} = \pi * (5m)^2 * 750m * 2600 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 750m$$

$$K_{BWS-PT} = 1,127 Tj = 313 MWh$$

Die Kapazität wäre also verglichen mit dem vorgestellten Konzept der Bergwerkspeicher verhältnismäßig klein. Allerdings wäre auch nur ein Wasserreservoir von knapp 60.000m³ notwendig. Ein solches Reservoir sollte verhältnismäßig einfach in einem alten Bergwerk untergebracht werden können (vgl. Kapitel 3.1.3).

Außerdem ließe sich mit einem solchen System eine weitere „Verkopplung“ von Speichern vornehmen. Diesen Vorteil bringen alle Pumpspeicher mit sich, die mit einem geschlossenen System arbeiten. Zusätzlich zur Stromspeicherung können die Reservoirs solcher Pumpspeicher auch als Wärmespeicher genutzt werden. Durch die großen Wasservolumen könnte durch die Ergänzung mit Wärmedämmung um die Speicher und Wärmetauschern in den Reservoirs auch eine Speicherung von Wärmeenergie möglich gemacht werden. Der finanzielle Aufwand wäre

dabei verhältnismäßig gering, da die notwendigen Speicherbecken bereits vorhanden sind oder für den Pumpspeicher ohnehin errichtet werden müssen und somit ein Teil der Kosten durch zwei unterschiedliche Speicherprinzipien abgedeckt werden kann.

Mit Blick auf die Energiewende und den Einsatz von Smart Grid und Smart Heat Grid wäre vor allem in urbanen Gebieten die Kombination von Strom- und Wärmespeichern eine denkbare Ergänzung für die herkömmliche Energieversorgung.

Auch in der reinen „Strombetrachtung“ sollte, was die Speichertechnologien angeht, ein Kompromiss gefunden werden. Eine reine Verwendung von Pumpspeichern wäre zwar durchaus denkbar, würde aber einen Verlust an Flexibilität bedeuten.

3.3 Modellanlage eines Pumpspeichers

Wie in den vorangegangenen Kapiteln aufgezeigt wurde, gibt es viele verschiedene, unterschiedlich realistische beziehungsweise umsetzbare Konzepte von Pumpspeichern. Diese Konzepte unterscheiden sich teilweise stark voneinander, aber sie haben eine Gemeinsamkeit: Sie lassen sich nur schwer bis gar nicht als funktionsfähiges Modell darstellen.

Da diese Arbeit auf einem Pumpspeichermodell beruht, muss also ein alternatives Konzept gefunden werden, das als Modell funktionsfähig ist. Die Hauptprobleme bei der Skalierung der vorgestellten Konzepte ist die notwendige Fallhöhe, um die Turbinen anzutreiben, ohne dass die mechanischen und elektrischen Verluste zu stark ins Gewicht fallen. Eine große Fallhöhe ist in einem Modell jedoch nur schwer umzusetzen. Eine Alternative dazu bieten die Konzepte, die das Wasser nur als Übertragermedium nutzen (vgl. Kapitel 3.1.4). Diese Konzepte sind bis jetzt hauptsächlich theoretischer Natur, da sie an anderer Stelle Probleme aufweisen, für die nur komplizierte und kostenaufwendige Lösungen vorliegen. Außerdem kann selbst mit der erhöhten Dichte des „Speichermediums“ nur eine lineare Reduktion der Fallhöhe erreicht werden, was bedeutet, dass selbst bei Blei, das eine um den Faktor 11 höhere Dichte hat als Wasser, bei einer Skalierung von 100m immer noch circa 9m Fallhöhe notwendig wären.

Zusätzlich sind diese Konzepte stark vom „Square-Cube-Law“ beeinflusst, was bedeutet, dass sie mit abnehmender Größe immer mehr von ihrem Vorteil der höheren Dichte einbüßen.

Letztendlich eignet sich keines der Modelle, eingeschlossen der in „Anhang 7: Weitere Pumpspeicherkonzepte“ ergänzten.

Um dennoch eine Modellanlage erstellen zu können, wird auf ein anderes Speicherkonzept zurückgegriffen, das bereits, wenn auch nur in geringer Zahl, Anwendung findet: Druckluftspeicher. Durch die Kompressibilität von Gasen wird zur Speicherung von Energie keine hydrostatische Säule benötigt. Durch die Komprimierung von Gas steigt der Druck und damit die innere Energie des Mediums. Dieser Druck baut sich im Gegensatz zu inkompressiblen Medien bei der Entspannung nicht schlagartig ab. Dieser Umstand kann genutzt werden, um eine Turbine über einen längeren Zeitraum anzutreiben.

Da es sich aber um ein Pumpspeichermodell handelt und nicht um ein Druckluftspeichermodell, wird diese Eigenschaft von Gas genutzt, um eine hydrostatische Wassersäule zu simulieren. Das Oberbecken der Anlage wird dafür durch einen Druckspeicher ersetzt.

Dieser Druckspeicher wird mit Druckluft beaufschlagt. Der dabei eingestellte Druck stellt die Mindestfallhöhe des Modells dar. Durch das anschließende Befüllen des Behälters mit Wasser steigen der Druck im Behälter und damit auch die simulierte Fallhöhe.

Anders als bei herkömmlichen Pumpspeichern kommt es dadurch zu einer verhältnismäßig hohen Fallhöhendifferenz zwischen gefülltem und entleertem Speicher. Trotzdem kommt dieses Konzept damit nah an das Verhalten eines Pumpspeichers heran, ohne ein komplexes Modell zu bilden. Des Weiteren bleiben auch die Bestandteile des Modells die gleichen wie bei einem echten Pumpspeicher: Es gibt Pumpe(n), Turbine(n), ein Oberbecken (Druckspeicher), ein Unterbecken und einen Steuercomputer mit dazugehöriger (Mess-)Peripherie.

4 Smart Grid

Im Rahmen eines größeren Projektes an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (kurz HAW) wird ein Smart Grid, also ein intelligentes Stromnetz, als Modell erstellt. Zu diesem Zweck werden verschiedene Modellanlagen, wie das in dieser Arbeit behandelte Pumpspeichermodell, zu einem Smart Grid gekoppelt.

Ein Teilziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Pumpspeichermodell zur Integration in dieses Smart Grid Modell vorzubereiten. Dazu soll einführend erläutert werden, was ein Smart Grid ist und warum es zukünftig eine große Rolle für die Energieversorgung spielt.

4.1 Definition

Ein Smart Grid ist ein Stromnetz, das durch die intelligente Vernetzung die Kommunikation einzelner Netzkomponenten ermöglicht und somit für ein optimiertes Zusammenwirken innerhalb des Netzes sorgt.

„Intelligente Stromnetze (Smart-Grids) kombinieren Erzeugung, Speicherung und Verbrauch. Eine zentrale Steuerung stimmt sie optimal aufeinander ab und gleicht somit Leistungsschwankungen – insbesondere durch fluktuierende erneuerbare Energien – im Netz aus. Die Vernetzung erfolgt dabei durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sowie dezentral organisierter Energiemanagementsysteme zur Koordination der einzelnen Komponenten. Das bedeutet, dass in einem Smart-Grid nicht nur Energie sondern auch Daten transportiert werden, sodass Netzbetreiber in kurzen Abständen Informationen zur Energieproduktion und -verbrauch erhalten. Bisher hatten die Netzbetreiber weder Kontrolle noch Kenntnis, wann und wo eine dezentrale Erzeugungsanlage Strom ins Netz einspeist. Wird der Anteil solcher „unkoordinierten“ Erzeuger zu hoch, steigt das Risiko von instabilen Netzzuständen.

Durch intelligente Vernetzung, Lastmanagement und Nachfrageflexibilisierung können somit eine effiziente Nutzung und Integration der erneuerbaren Energien sowie eine Optimierung der Netzauslastung erreicht werden.“ (Umweltbundesamt, Quelle [28])

4.2 Funktionsweise

Ein Smart Grid funktioniert grundlegend wie herkömmliche Stromnetze auch. Es besteht wie herkömmliche Stromnetze auch immer aus vier Komponenten: dem Erzeuger (vor allem Kraftwerke), dem Überträger (Übertragungsnetzbetreiber), dem Versorger (Verteilnetzbetreiber) und dem Verbraucher (Privathaushalte, Öffentliche Einrichtungen, Unternehmen).

Der Überträger sorgt dafür, dass der Strom vom Erzeuger zum Verbraucher gelangt, hat aber ansonsten keinen Einfluss auf das Stromnetz. Er fungiert wie ein Postbote, der die Post nur zustellt, dabei aber keinen Einfluss auf ihren Inhalt hat und wie dieser wahrgenommen wird.

Der Versorger beliefert seine Stromkunden. Dafür versucht er im Voraus zu kalkulieren, wann seine Verbraucher wie viel Strom benötigen. Diesen Strom kauft er von den Erzeugern an der Strombörse ein. Anhand dieser Einkäufe wissen die Erzeuger, wann sie wie viel Strom produzieren müssen. Abweichungen von diesen Kalkulationen der Versorger werden durch die Regelleistung (vgl. Kapitel 1, Abbildung 1-1) aufgefangen.

In herkömmlichen Stromnetzen wird bislang die Erzeugung an den Verbrauch angepasst. Das funktioniert so lange, wie die Erzeuger dann ihre Primärenergie zur Verfügung haben, wenn sie Strom erzeugen müssen. Wie bereits erwähnt ist das bei Sonne und Wind als Energiequelle nicht mehr gegeben.

Deshalb müssen Stromnetze intelligent werden. Es wird in Zukunft nicht mehr möglich sein, die Erzeugung auf den Verbrauch abzustimmen. Vielmehr muss es eine aktive Abstimmung beider Seiten aufeinander geben. Deshalb ist es wichtig, eine Kommunikation zwischen Verbrauchern und Erzeugern möglich zu machen. Das ist die Aufgabe eines Smart Grid.

4.3 Smart Grid als Grundlage der Energiewende

Wie aus Kapitel 1 und Kapitel 3 hervorgeht, ist es in einem herkömmlichen Stromnetz sehr schwierig bis unmöglich, die Versorgung der Verbraucher mit den schwankenden Erzeugungen aus erneuerbaren Energien zu gewährleisten.

Der Stromverbrauch muss den volatilen Erzeugungen aus Wind und Sonne soweit möglich angepasst werden, da andersherum keine Anpassung möglich ist. Zur Pufferung dieses Effektes können Speicher genutzt werden, die kurzfristig die Netzlasten aufnehmen beziehungsweise abgeben. Je besser die einzelnen Komponenten des Netzes – sowohl Erzeuger wie auch Verbraucher – dabei zusammenarbeiten, desto effektiver ist das Gesamtsystem und desto weniger müssen die Speicher eingreifen. Wesentlicher Bestandteil dieser Zusammenarbeit ist das Smart Grid, das dadurch auch zur Grundlage des Gelingens der Energiewende wird.

Über ein Smart Grid kann der Stromverbrauch jederzeit an die Erzeugung angepasst werden. Dabei agieren Speicher sowohl als Erzeuger wie auch als Verbraucher, je nachdem ob Strom im Netz überschüssig ist oder benötigt wird. Die einzelnen Technologien aus Kapitel 1 spielen dabei unterschiedliche Rollen.

Batteriespeicher haben ein schnelles Ansprechverhalten, was sie für eine kurzfristige Ausregelung des Netzes prädestiniert. Die Speicherkapazität ist jedoch verhältnismäßig teuer (150 €/kWh (Blei-Akkus) bis 1000 €/kWh (Lithium-Ionen-Akkus), vgl. Quelle [44]), und auch die Leistungsstufen sind durch die Notwendigkeit von Leistungselektronik (Umrichter und Transformatoren) sowohl wirtschaftlich wie auch technisch eingeschränkt.

Power-to-Gas hingegen ist von der Speicherkapazität her günstig, da der physikalische Speicher (das Gasnetz) bereits vorhanden ist und somit keine zusätzlichen Kosten erzeugt. Und auch von den Leistungsstufen sind Power-to-Gas-Anlagen mit einem Spektrum von einigen Kilowatt bis hin zu Anlagen mit über einem Gigawatt deutlich flexibler. Nachteilig ist die geringe Speichereffektivität, also der Gesamtwirkungsgrad ($\eta_{ges, PtG} \cong 25\%$). Das Ansprechverhalten ist, je nach Anlagengröße (kleine Turbinen starten innerhalb einiger Sekunden, große Gaskraftwerke benötigen mehrere Minuten zum Anfahren), relativ gut. Dadurch würde sich diese Technologie vor allem zur Spitzenlastdeckung eignen.

Pumpspeicher verfügen genau wie Power-to-Gas-Anlagen über relativ preiswerte Speicherkapazität (circa 100 €/kWh) gehen aber in der Regel mit größeren Einschnitten in die Natur einher. Auch die Leistung ist relativ variabel und im Vergleich zu Power-to-Gas in noch größeren Dimensionen möglich. Genauso sind die Kosten für die Leistung deutlich geringer als zum Beispiel für Batteriespeicher. Und die Effektivität der Pumpspeicher ist deutlich höher als die von Power-to-Gas-Anlagen ($\eta_{ges, PS} \cong 80\%$). Dadurch eignen sich Pumpspeicher von den drei Technologien am besten, um die Grundlast in Kombination mit Wind- und Sonnenenergie zu sichern.

Das Zusammenwirken der Speicher mit Erzeugern und Verbrauchern kann nur funktionieren, wenn die volatile Erzeugung von Strom durch Wind und Sonne kurzfristig durch Speicher und Verbraucher aufgefangen werden kann. Ein solches Zusammenwirken unterschiedlicher Komponenten in einem riesigen System wie dem deutschen (beziehungsweise europäischen) Stromnetz ist heute schon hoch komplex und wird mit zunehmendem Anteil an erneuerbaren Energien immer komplexer und schneller und damit auch fehleranfälliger.

Um diesen neuen Anforderungen gerecht zu werden, bietet es sich an, den langen Weg über die Strombörsen und die Versorgungsstruktur durch eine intelligente Kommunikation innerhalb des Netzes abzukürzen. Eine solche Abkürzung kann ein Smart Grid sein.

5 Anlagentechnische Optimierung des Pumpspeichermodells

5.1 Grundaufbau der Anlage

Grundlage dieser Masterthesis ist ein vorhandenes Pumpspeichermodell, das 2018 an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg im Rahmen eines studentischen Projektes (Bachelorprojekt) gebaut wurde. Dabei ging es in erster Linie um den rudimentären Aufbau der Anlage und die Beschaffung der Hauptkomponenten.

Die Hauptkomponenten sind:

- (1) Turbinen-Generator-Baugruppe (1x Peltontrubine mit 110W DC-Generator)
- (2) Pumpen (3x SHURflo 8030-813-239, 3-Kammer-Membranpumpe, 0-10bar, 12V, 12A DC)
- (3) Membran-Druckausdehnungsgefäß (2x Reflex S 100, 88l Nennvolumen, 1“-Gewindeanschluss)
- (4) Kaltwasserzähler (1x Einstrahl-Trockenläufer, PN16, ¾“-Gewindeanschluss, M-Bus-Ausgang)
- (5) Rohrfedermanometer (1x Wika, 0-16bar, glyceringefüllt)
- (6) Glasbecken als Wasserreservoir (400x400x1000 mm)
- (7) Rohrsystem (TECElogo 25mm und 16mm)

Grundvoraussetzung für die Steuerbarkeit einer Anlage gleich welcher Größe ist, dass das Verhalten der Anlage soweit bekannt oder abzusehen ist, dass auf möglichst viele Eventualitäten eingegangen werden kann. Da dies bei dem Grundaufbau der Modellanlage nicht der Fall ist, muss sie zunächst soweit optimiert werden, dass die geplante Steuerung nicht durch unabsehbare Fehler gestört wird. Einen wesentlichen Faktor dabei bilden die Membrangefäße, da sie für dieses Modell zweckentfremdet wurden und ihr Verhalten daher nicht vollständig absehbar ist.

5.1.1 Hauptkomponenten der Anlage

Um die Funktionsweise der Anlage zu verstehen, werden im ersten Schritt die Bauteile analysiert. Das kann Aufschluss darüber geben, wie diese sich im Einzelnen und im Zusammenspiel untereinander verhalten.

5.1.1.1 Turbinen-Generator-Baugruppe

Bei der Turbinen-Generator-Baugruppe handelt es sich um eine Pelton-Turbine, die mit einem 110W-Gleichstromgenerator kombiniert ist. Der Aufbau wurde vormontiert von einer Privatperson über die Internetplattform Ebay (<https://www.ebay.de/>) erworben.



Abbildung 5-1: Pelton-Turbine

Quelle: <http://www.mechanicalbooster.com/2016/10/pelton-turbine-working-main-parts-application-with-diagram.html>

Als Datenblatt für die Turbine liegt lediglich eine – wahrscheinlich selbst vermessene – Tabelle mit den Leistungsdaten bei unterschiedlichen Fallhöhen und Düsenquerschnitten vor.

Tabelle 5-1: Leistungsdaten der Turbinen-Generator-Baugruppe

Düsenausgangs- durchmesser in mm	Fallhöhe in m	Liter pro Sekunde	Spannung in Volt	Leistung in Watt
3	100	0,31	25	110
3	80	0,28	22	100
3	60	0,24	19	90
3,5	40	0,27	16	70
4	35	0,33	15	60
4	30	0,30	13	60
4,5	25	0,35	12	50
5	20	0,39	11	50
5,5	15	0,41	10	40
7	10	0,54	8	30

Quelle: <https://www.ebay.de/itm/Kleinstwasserkraftwerk-110-Watt-Pelton-Wasserturbine-Wasserrad-Generator-KWK-/233099743030>

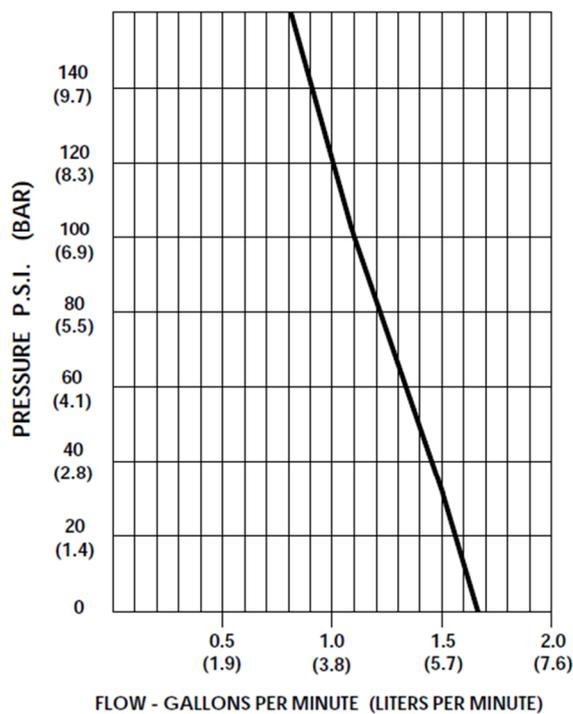
Wie in Tabelle 5-1 zu sehen ist, erreicht der Generator seine maximale Leistung von 110 Watt bei einer Fallhöhe von 100m. Das entspricht ungefähr einem Druck von 10bar.

$$p_{hydrost} = \rho * g * H = 997 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s} * 100m = 978.057 Pa = 9,78bar \cong 10bar$$

Je geringer die Fallhöhe wird, desto weniger Leistung generiert der Generator. Ab 40m Fallhöhe muss laut der Tabelle auch der Düsenausgangsdurchmesser vergrößert werden, um die genannten Leistungswerte zu erreichen. Mit erhöhtem Düsenquerschnitt steigt der Massenstrom, was eine Verkürzung der Ausspeicherzeit nach sich zieht.

5.1.1.2 Pumpen

Bei den Pumpen handelt es sich um Dreikammer-Membranpumpen von der Firma „SHURflo“. Sie werden über einen Gleichstrommotor mit 12V und 12A Spannungs- und Stromaufnahme angetrieben. Sie leisten also maximal 144W und erreichen damit einen maximalen Druck von circa 10bar (150psi = 10,34bar).



PRESSURE (PSI)	FLOW (GPM/LIT)	RPM MIN/MAX	CURRENT (AMPS)	VOLTAGE (VOLTS)
OPEN	1.66/6.3	2265/2310	4.5	12 VDC
10	1.62/6.1	2245/2275	4.9	"
20	1.55/5.9	2215/2230	5.5	"
30	1.49/5.6	2180/2200	6.2	"
40	1.43/5.4	2145/2160	6.8	"
50	1.37/5.2	2115/2130	7.4	"
60	1.31/5.0	2080/2095	8.0	"
80	1.20/4.5	2010/2040	9.1	"
100	1.10/4.2	1955/1980	10.1	"
120	1.00/3.8	1895/1930	10.9	"
140	0.88/3.3	1840/1875	11.7	"
150	0.83/3.1	1815/1865	12.0	"

Abbildung 5-2: Leistungsdaten der Pumpen
Quelle: SHURflo Produktdatenblatt, Modell 8030-813-239

Im linken Graph (vgl. Abbildung 5-2) ist die Kennlinie der Pumpe abgebildet. Im Unterschied zum Kennfeld einer Radialpumpe verhält sich diese Pumpe weitestgehend linear. Der maximale Volumenstrom beträgt 6,3l/min bei offenem System. Dabei ist auch die Stromaufnahme mit 4,5A am geringsten. Mit zunehmendem Systemdruck sinkt der Volumenstrom und die Stromaufnahme steigt, bis bei 150psi Systemdruck nur noch 3,1l/min durch die Pumpe strömen und diese eine elektrische Leistung von 144W aufnehmen.

$$P_{el,DC} = U * I = 12V * 12A = 144W$$

Die Umrechnung von bar in psi kann nicht über SI-Einheiten bewerkstelligt werden, da diese Einheit auf dem US-amerikanischen System beruht. Der Umrechnungsfaktor ist:

$$1 \text{ bar} \cong 14,5 \text{ psi}$$

Damit entsprechen 150psi ungefähr 10,3bar. Die Pumpen sind demnach stark genug, um den Anlagendruck von maximal 10bar zu gewährleisten.

Die Pumpen verfügen zudem über einen Überhitzungsschutz. Ab einer Temperatur von 107°C schalten die Pumpen automatisch ab. Laut Herstellerangaben wird diese Temperatur nach 90 Minuten erreicht, wenn die Pumpen bei voller Leistung arbeiten und die Umgebungstemperatur 23,9°C (75°F) beträgt (vgl. Abbildung 5-3).

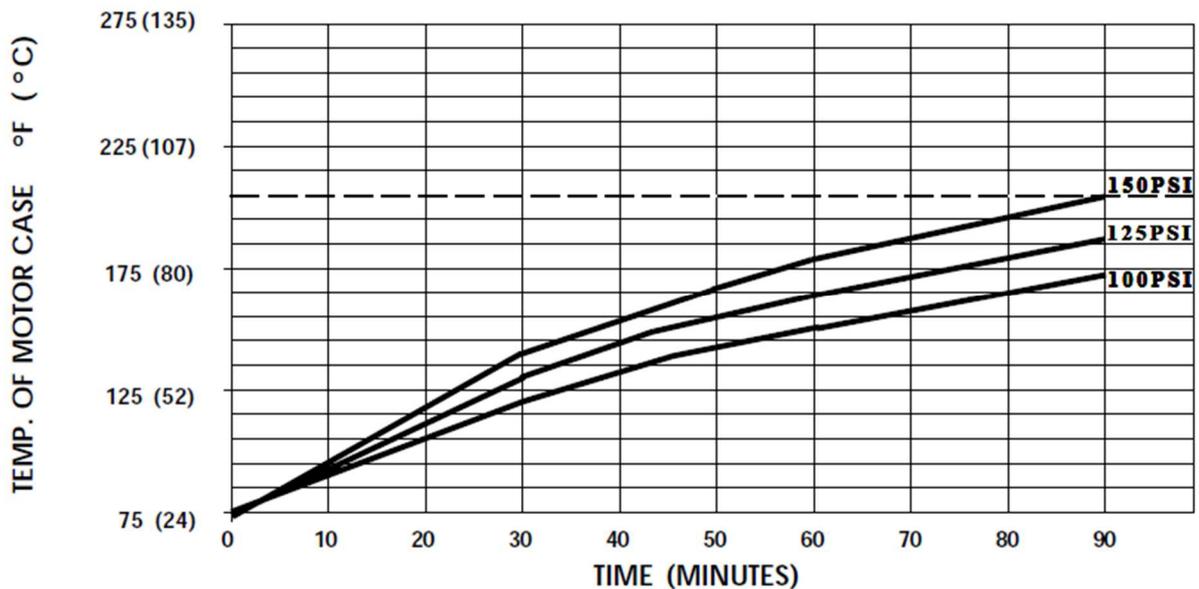


Abbildung 5-3: Temperaturentwicklung der Pumpen bei 23,9°C Umgebungstemperatur
Quelle: SHURflo Produktdatenblatt, Modell 8030-813-239

Aus Abbildung 5-2 kann abgelesen werden, dass die Pumpen bei 10bar Druck noch einen Volumenstrom von 3,1l/min fördern. Daraus kann errechnet werden, dass auch bei voller Leistung innerhalb dieser Anlage keine Notabschaltung der Pumpen wegen Überhitzung erfolgen sollte. Ausgehend von keinerlei negativem Einfluss der Pumpen aufeinander bei gleichzeitigem Betrieb ergibt sich eine Füllzeit von:

$$V_{ges,DB} = 2 * V_{Nenn,DB} = 2 * 88l = 176l$$

$$\dot{V}_{ges,Pump} = 3 * \dot{V}_{Pump} = 3 * 3,1 \frac{l}{min} = 9,3 \frac{l}{min}$$

$$t_{Beflg,3Pump} = \frac{V_{ges,DB}}{\dot{V}_{ges,Pump}} = \frac{176 l}{9,3 \frac{l}{min}} = 18,9 min$$

Selbst wenn nur eine Pumpe betrieben wird, werden die 90 Minuten zur vollständigen Befüllung nicht benötigt.

$$t_{Beflg,1Pump} = \frac{V_{ges,DB}}{\dot{V}_{Pump}} = \frac{176 l}{3,1 \frac{l}{min}} = 56,8 min$$

Auch vor Überdruck sind die Pumpen geschützt. Die Werkseinstellung für den Überdruckschutz sind 150psi. Dieser Wert kann von 140psi bis 160psi frei eingestellt werden. Laut Hersteller sind die Pumpen gegen Rückströmung gesichert.

5.1.1.3 Membran-Druckausdehnungsgefäße

Bei den Membrangefäßen handelt es sich um Ausdehnungsgefäße für Heizungs-, Kühl- und Solaranlagen der Firma Reflex. Die verwendete Baureihe „S“ ist dabei speziell für Solaranlagen mit einem Frostschutzmittelzusatz von bis zu 50% ausgelegt, kann aber auch in Heizungsanlagen verwendet werden. Bei den Gefäßen handelt es sich um „S 100“ (vgl. Abbildung 5-4).

Reflex Membran-Druckausdehnungsgefäße der Serie S

Als Spezialist für Solaranlagen konstruiert, ist die Serie S besonders für hohe Frostschutzmittelzusätze bis 50 % und Drücke bis 10 bar ausgelegt. Damit eignet sie sich natürlich auch bestens für Heiz- und Kühlsysteme.

Gefäßvolumen	2–600 l
Zul. Betriebsüberdruck	10 bar
Zul. Betriebstemperatur Gefäß/Membran	120 °C/70 °C
Ausführung	ab S50 mit Füßen
Farbe	Grau, S8–S33 auch in Weiß erhältlich



Abbildung 5-4: Reflex Membran-Druckausdehnungsgefäß Baureihe S
Quelle: Reflex, Datenblatt: Membran-Druckausdehnungsgefäße

Die Gefäße sind mit einem Nenn-/Nutzvolumen von 88 Litern angegeben. Sie verfügen über einen seitlichen 1“-Gewindeanschluss für die Wasserseite und ein Schrader-Ventil für die Gasseite.

Die beiden Seiten sind durch eine flexible Gummimembran getrennt, die sich je nach Kombination aus Vordruck (Gasseite) und Anlagendruck (Wasserseite) ausdehnt. Ist der gasseitige Druck höher, dehnt sich die Membran auf die Wasserseite aus, während bei höherem Wasserdruck das Volumen der Gasseite komprimiert wird.

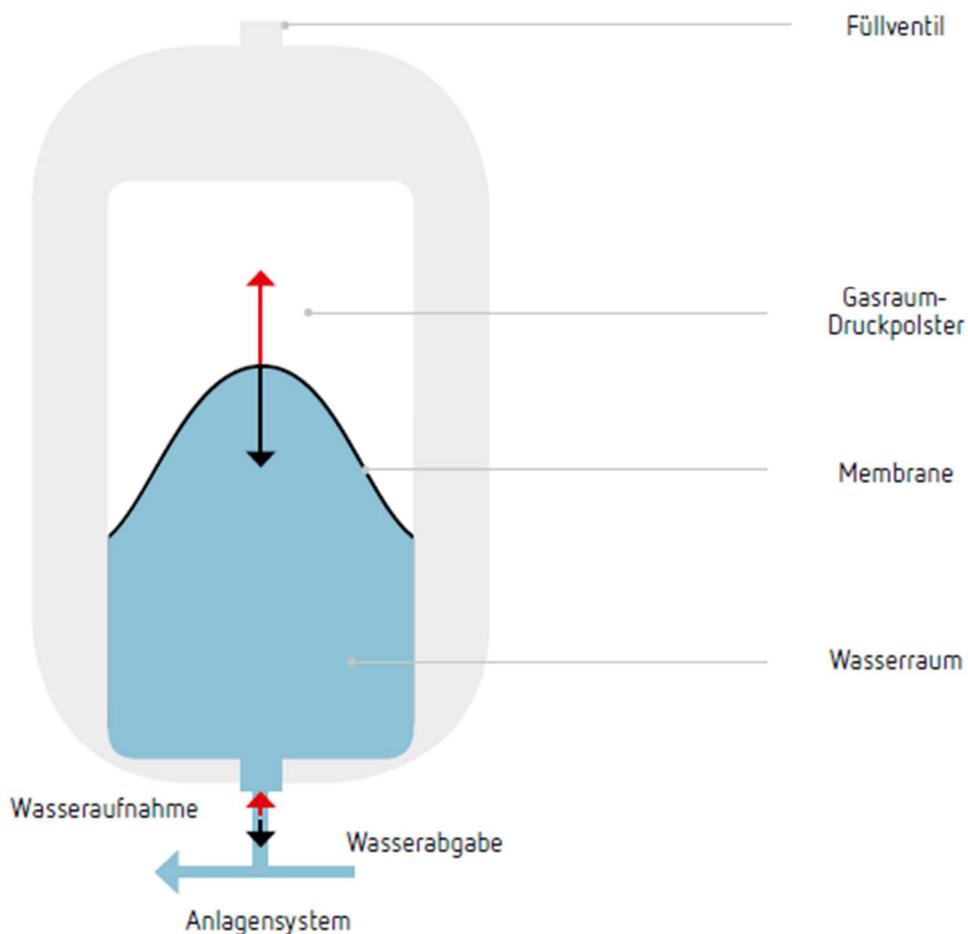


Abbildung 5-5: Prinzip-Skizze Membran-Druckausdehnungsgefäß
Quelle: Reflex, Datenblatt: Membran-Druckausdehnungsgefäße

Die Membran ist für einen maximalen Anlagendruck von 10 bar ausgelegt, wobei der werkseitige Vordruck für die Gasseite 3bar beträgt.

Aus dem idealen Gasgesetz lässt sich mit den beiden Drücken die Volumenänderung vom leeren zum gefüllten Zustand berechnen. Dazu wird angenommen, dass der Behälter vollständig dicht ist und sich somit die Masse des eingeschlossenen Gases nicht verändert. Außerdem kann von annähernd konstanter Temperatur ausgegangen werden.

$$p * V = m * R * T = const. \quad (10)$$

$$\begin{aligned} p_1 * V_1 &= p_2 * V_2 \\ \frac{p_1}{p_2} &= \frac{V_2}{V_1} = \frac{3bar}{10bar} = 0,3 \\ V_2 &= 0,3 * V_1 \end{aligned}$$

Da die Typenbezeichnung des Membrangefäßes von seinem Gesamtvolumen abgeleitet wird, besitzen die verwendeten „Reflex S100“ ein Gesamtvolumen von 100 Litern pro Behälter. Mit einem Nutzvolumen von 88 Litern beläuft sich das von der Membran nicht verdrängte Totvolumen wasserseitig auf 12 Liter. Diese Betrachtung widerspricht dem vorher berechnetem Volumenverhältnis von 0,3.

$$\frac{V_{tot,DB}}{V_{Nenn,DB}} = \frac{12l}{88l} = 0,136 \neq 0,3$$

Bei einem Volumenverhältnis von 0,136 würde sich ein maximaler Druck von

$$p_2 = \frac{p_1}{0,136} = \frac{3bar}{0,136} = 22,06bar$$

ergeben. Das würde den zulässigen Druck für das Membrangefäß um mehr als das Doppelte überschreiten. Das tatsächlich nutzbare Volumen muss also im endgültigen Aufbau der Anlage mit den tatsächlich verwendeten Drücken gemessen werden.

5.1.1.4 Kaltwasserzähler

Der Kaltwasserzähler ist das einzige anlagentechnische Bauteil, das digitale Messwerte liefert. Alle anderen digitalen Messwerte betreffen die elektronischen Bauteile (Netzteile und Generator/-Last).

Bei dem Wasserzähler der Lorenz GmbH & Co. KG handelt es sich um einen Einstrahl-Trockenläufer mit 8-Rollenzählwerk. Der Wasserstrom wird durch ein zweifach gelagertes Flügelrad geleitet, das dadurch in Bewegung versetzt wird. Diese Bewegung wird magnetisch auf das Zählwerk weitergeleitet. Da kein spezielles Datenblatt zu dem Zähler vorliegt, werden anhand des zulässigen Volumenstroms (2,5m³/h), der Baulänge (ca. 110mm) und der anlagenseitigen Anschlüsse (3/4“) die technischen Daten eruiert.

Der verwendete Kaltwasserzähler ist für einen Nennvolumenstrom (vgl. Abbildung 5-6, Dauerdurchfluss (EWG)) von 1,5m³/h geeignet.

Das entspricht

$$\dot{V}_{zul} = 1,5 \frac{m^3}{h} = 1,5 * \frac{1000 \frac{l}{m^3}}{60 \frac{min}{h}} = 25 \frac{l}{min}$$

und liegt damit deutlich über den Volumenströmen, die laut Datenblatt in der Turbine notwendig sind (vgl. Kapitel 5.1.1.1).

Technische Daten ETKD, ETWD							
Dauerdurchfluss	Q ₃	m ³ /h	1,6	2,5	2,5	2,5	4
Entspricht Dauerdurchfluss (EWG)	Q _n	m ³ /h	1,0	1,5	1,5	1,5	2,5
Erreichbarer Messbereich	Q ₃ /Q ₁	R	80H	80H/40V	80H/40V	80H/40V	80H/40V
Standard Messbereich (*)	Q ₃ /Q ₁	R	80H	80H/40V	80H/40V	80H/40V	80H/40V
Entspricht Metrol. Klasse (EWG)	Klasse		B-H	B-H/A-V	B-H/A-V	B-H/A-V	B-H/A-V
Überlastdurchfluss (**)	Q ₄	m ³ /h	2,00	3,125	3,125	3,125	5
Min. Durchfluss (**)	Q ₁	l/h	20H	31H/63V	31H/63V	31H/63V	50H/100V
Anlauf	-	l/h	<10	<10	<10	<10	<14
Anzeigebereich	min	l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	max	m ³	R8 99.999,999	R8 99.999,999	R8 99.999,999	R8 99.999,999	R8 99.999,999
			R7 99.999,99	R7 99.999,99	R7 99.999,99	R7 99.999,99	R7 99.999,99
Temperaturbereich	-	°C	0,1 - 30 30 - 90				
Betriebsdruck	MAP	bar	16	16	16	16	16
Impulswertigkeit	-	L/Imp.	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
Druckverlust bei Q ₃	Δp	bar	Δ0,63	Δ0,63	Δ0,63	Δ0,63	Δ0,63
Mechanische Umgebungsbedingung	-	-	M1	M1	M1	M1	M1
Klimatische Umgebungsbedingung (***)	-	°C	5 - 70	5 - 70	5 - 70	5 - 70	5 - 70
Strömungsprofilempfindlichkeit	-	-	U0/D0	U0/D0	U0/D0	U0/D0	U0/D0
Abmessungen und Gewichte:							
Nennweite	DN	mm	15	15	15	20	20
		Zoll	½"	½"	½"	¾"	¾"
Baulänge	L2	mm	110	80	110/115	130	130
Baulänge mit Verschraubung ca.	L1	mm	190	160	190/195	226	226
Gewinde Zahler G x B	D1	Zoll	¾"	¾"	¾"	1"	1"
Gewinde Verschraubung	D2	Zoll	½"	½"	½"	¾"	¾"
Breite ca.	B	mm	66	66	66	66	66
Höhe ca.	H1	mm	77	77	77	80	80
Gewicht ca.	-	kg	0,44	0,42	0,44/0,45	0,52	0,52

(*) Andere Messbereiche (R) auf Anfrage
 (**) Werte beziehen sich auf Standard Messbereich
 (***) Betaugung möglich

Abbildung 5-6: Technische Daten Kaltwasserzähler
 Quelle: Datenblatt ETKD und ETWD

5.1.1.5 Rohrfedermanometer

Das verwendete Rohrfedermanometer der Firma WIKA nutzt eine Feder als Druckindikator. Der Anzeigebereich des Manometers liegt im Bereich von 0bar bis 16bar. Es gibt keinerlei elektrische Anschlüsse, sodass das Manometer nur zur analogen Überprüfung der Anlagenfunktion genutzt werden kann.

5.1.1.6 Glasbecken

Das Glasbecken dient als Wasserreservoir der Anlage (vgl. Kapitel 3, unteres Becken). Es hat Außenmaße von 390mm Tiefe, 395mm Höhe und 990mm Breite und damit ein Gesamtvolumen von

$$V_{ges,Becken} = B * H * T = (990 * 395 * 390)mm^3 = 1,525 * 10^8mm^3 = 0,1525m^3 = 152,5l$$

Damit würde das Volumen des Beckens nicht ausreichen, um die kompletten 176l Gesamtvolumen der Membrangefäße zu füllen. Da diese aber vorgefüllt werden und eine vollständige Befüllung der Anlage sowieso fragwürdig ist, stellt das zunächst kein Problem dar. Verkleinert wird das Volumen des Beckens nachträglich durch verschiedene Einbauten. Diese Volumen sind aber verhältnismäßig gering und werden daher nicht weiter betrachtet.

5.1.1.7 Rohrsystem

Das Rohrsystem TECElogo der Firma TECE besteht aus flexiblen Kunststoffrohren, die mit Kunststoff fittings mittels eines Schneidring- oder Spannringsystems verbunden werden. Die Fittings haben eine maximale Druckstufe von PN16 (16bar) und können auch mit Übergängen zu Rotguss- oder Messing-Gewindekomponenten verwendet werden. Das Rohrsystem lässt sich problemlos demontieren und kann daher sehr gut nachträglich angepasst werden. In der Anlage werden ausschließlich die Abmessungen (Außendurchmesser) 25mm und 16mm verwendet. Das System bietet aber auch Abmessungen von 12mm bis zu 63mm. Die verwendeten Abmessungen des TECElogo-Systems haben beide eine Wandstärke von ungefähr 2mm.

Die Anschlüsse der Anlagenkomponenten werden mittels Messing-Gewindefittings umgesetzt, genau so der Anschluss der notwendigen Armaturen.

Durch die verhältnismäßig großen Baulängen der Kunststoff fittinge gibt es im relativ kleinen Aufbau des Modells Schwierigkeiten, die Bauteile platzsparend und sinnvoll zu montieren. Aus diesem Grund müssen kleinere Umwege im Rohrleitungsverlauf in Kauf genommen werden, um alle notwendigen Armaturen und Abgänge in die Anlage einbringen zu können.

Das Rohrsystem verbindet die Anlagenbestandteile wie in Abbildung 5-7 dargestellt.

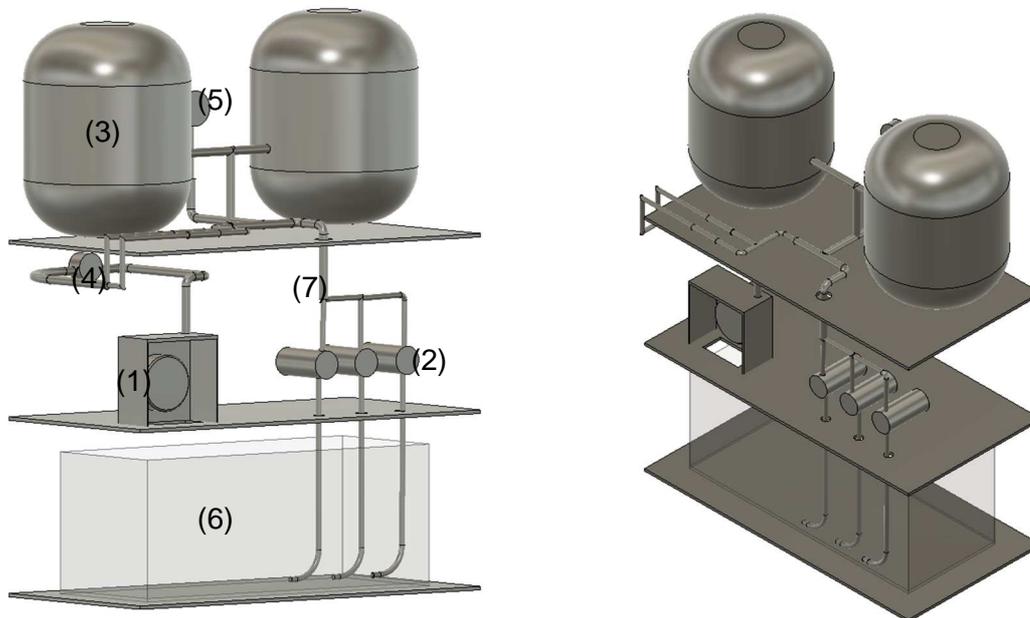


Abbildung 5-7: 3D-Modell des Grundaufbaus des Pumpspeichermodells
Quelle: Eigene Darstellung

- (1) Turbine
- (2) Pumpen
- (3) Membran-Druckausdehnungsgefäß
- (4) Kaltwasserzähler
- (5) Rohrfedermanometer
- (6) Glasbecken als Wasserreservoir
- (7) Rohrsystem



Abbildung 5-8: Foto des Grundaufbaus der Anlage
Quelle: Bachelor Projekt Pumpspeicheranlage

Bei den beiden in Abbildung 5-8 abgebildeten grauen Behältern auf der oberen Ebene handelt es sich um die Membrangefäße. Dazwischen ist das Manometer montiert. Auf der mittleren Ebene stehen rechts die drei Pumpen und links die Pelton-Turbine. Dazwischen ist ein provisorisches Netzgerät zu sehen, das für die Erstbefüllung der Anlage genutzt wurde, aber nicht für die Tests. Auf der unteren Ebene befindet sich das Becken mit den drei Saugleitungen der Pumpen.

Um die Anlage betreiben zu können, fehlen in diesem Zustand noch zwei wesentliche Bestandteile:

- Netzgeräte zur Versorgung der Pumpen
- Ein elektrischer Widerstand als Last am Generator

5.1.2 Probetrieb der Anlage

Als Netzteil wurde für die ersten Testläufe der Anlage provisorisch ein „Voltcraft DPPS-32-15“ (32V, 15A, DC) verwendet. Mit diesem Netzteil können maximal zwei der drei Pumpen betrieben werden, wenn diese parallel verschaltet sind. Für erste Tests der Anlage ist das ausreichend und alle Pumpen können so auf Funktionsfähigkeit überprüft werden. Allerdings können die Pumpen nicht gleichzeitig getestet werden. Hieraus resultiert für diese Testläufe durch die hydraulisch parallele Verschaltung der Pumpen ein geringerer Volumenstrom, woraus wiederum eine geringere Belastung für die Pumpen und die gesamte Anlage entsteht.

Da keine elektrische Last für den Generator vorhanden ist, kann dieser bei den ersten Tests nicht überprüft werden. Lediglich der hydraulische Zustand der Turbine wird geprüft. Sie arbeitet erwartungsgemäß. Durch fehlende Strömungsführung innerhalb der Turbine verteilt sich das Wasser beim Austritt aus den Schaufeln der Pelton-Turbine stark, woraus wiederum ein erhöhter Wasserverlust beim Übergang in das Glasbecken resultiert.

Die Ergebnisse der ersten Tests wurden nicht schriftlich festgehalten, da sie frühzeitig gezeigt haben, dass die Anlage nicht in ihrem Grundzustand verbleiben kann. Jede genauere Untersuchung der Anlage in ihrem Grundaufbau wäre demnach hinfällig.

5.2 Optimierung(-spotenzial) des Grundaufbaus

Die ersten Tests liefern zwar keine verwertbaren Ergebnisse, zeigen aber einige Schwachpunkte der Anlage auf, die für den reibungslosen Betrieb hinderlich sein könnten. Diese Schwachstellen sollen so gut wie möglich durch einen Umbau der Anlage behoben werden. Dabei geht es vor allem um folgende Punkte:

1. Bereits nach zwei Wochen kann eine Algenbildung (Braunalgen) im Wasserreservoir festgestellt werden. Diese könnten langfristig zu einer starken Verschmutzung führen.
2. Der Wasseraustritt aus der Turbine erfolgt unkontrolliert, weshalb es zu Wasserverlusten am Übergang von der Turbine zum Reservoir kommt. Außerdem ist das Turbinengehäuse unzureichend abgedichtet, was an der Schnittstelle zum Gestell der Anlage ebenfalls zu leichten Wasserverlusten führt.
3. Der Sammler hinter den Pumpen ist bedingt durch das Rohrsystem nicht strömungstechnisch optimiert. Dadurch wird eine Schaltung der Pumpen nicht die erwarteten Ergebnisse liefern. Wenn man von 100% Leistungsumsetzung bei der ersten Pumpe ausgeht, dann wird sich mit der Zuschaltung der zweiten Pumpe keine Verdopplung des Volumenstroms ergeben. Die dritte Pumpe wird einen noch geringeren Beitrag zum Gesamtvolumenstrom liefern.
Die Pumpen arbeiten durch die rechtwinklige Anordnung der einzelnen Zuflüsse zum Sammler teilweise gegeneinander.
Gegeben durch die Dimensionierung der Rohrleitungen würde aber aller Voraussicht nach auch ein strömungstechnisch optimierter Sammler nicht zu dem gewünschten Ergebnis führen.
4. Die Pumpen liefern laut Datenblatt bei einem Anlagendruck von 10bar (Maximum) einen Volumenstrom von 3,1l/min pro Pumpe. Das entspricht einem Gesamt-Volumenstrom von:

$$\dot{V}_{ges} = n_{pumpe} * \dot{V}_{pumpe} = 3 * 3,1 \frac{l}{min} = 9,3 \frac{l}{min} = 0,155 \frac{l}{s}$$

Das 25er-Rohrsystem hat einen Außendurchmesser von 25mm und eine Wandstärke von circa 2mm was einer Querschnittsfläche von

$$A_{Rohr,25} = (d_{außen} - 2 * t_{Wand})^2 * \frac{\pi}{4} = (25mm - 2 * 2mm)^2 * \frac{\pi}{4} = 346,36mm^2$$

entspricht. Daraus ergibt sich eine Strömungsgeschwindigkeit für das Wasser von:

$$u = \frac{\dot{V}_{ges}}{A_{Rohr,25}} = \frac{9,3 \frac{l}{min}}{346,36mm^2} = \frac{9,3 * \frac{0,001 m^3}{60 s}}{346,36 * 10^{-6}m^2} = 0,448 \frac{m}{s}$$

Bedingt durch diese geringe Strömungsgeschwindigkeit sind die Druckverluste in den Rohren durch den quadratischen Einfluss wahrscheinlich sehr gering.

$$\Delta p_{V,Rohr} = \frac{\rho}{2} * u^2 * \lambda * \frac{l}{d} \tag{11}$$

Allerdings verfügt das TECElogo-Rohrsystem nicht über normale Rohrbögen, sondern nur über Winkel. Während Standardrohrbögen ($r_{Bogen} = 3 * d_{Rohr}$) ζ -Werte zwischen 0,1 und 0,25 aufweisen haben Winkel ζ -Werte über 1. Dies bedeutet, dass die Druckverluste um das Zehnfache höher sein können als in einer Anlage mit Bögen.

Generell ergeben sich die größten Druckverluste bei Anlagen wie dieser (kurze Strecken mit vielen Formteilen) durch die Formteile.

Dieser Anteil ist durch die Winkel noch deutlich höher, sodass eine strömungstechnische Optimierung der Rohrleitungen und damit auch des Sammlers kaum sinnvoll wäre.

5. Die Membrandruckausdehnungsgefäße (kurz Membrangefäße) sind nicht für offene Anlagen wie diese Versuchsanlage gedacht. Ihr Einsatzgebiet sind ursprünglich Heizungs- oder solarthermische Anlagen mit geschlossenen Systemen. In diesen Systemen dienen sie als Puffer bei temperaturinduzierten Volumenschwankungen der verwendeten Medien und damit zur Stabilisierung des Anlagenvolumens. Da es sich bei dem vorliegenden Pumpspeichermodell um eine offene Anlage handelt, sind die Membrangefäße nur bedingt für den gedachten Einsatz geeignet. Es gibt mehrere Probleme, die nur zum Teil behoben werden können.

(1) Die Gefäße sind von innen nicht korrosionsbeständig. Da das Wasser durch das offene Reservoir immer wieder mit Sauerstoff angereichert wird, verrosten die Behälter langsam von innen. Dieses Problem kann nicht behoben werden. Die Behälter müssen früher oder später ausgetauscht werden.

(2) Die Behälter sind nicht für die angedachten Druckschwankungen von 0bar bis 10bar ausgelegt. Die Membran ist für einen eher kleinen Arbeitsbereich von 1bar bis 2bar bei einem maximalen Überdruck von 10bar entwickelt. Sie könnte durch den vergrößerten Arbeitsbereich häufig knicken und auf Dauer reißen.

Um dieses Problem zu umgehen, sollte darauf geachtet werden, die Druckbehälter nicht vollständig leer laufen zu lassen, damit sich die Membran nur in einem bestimmten Arbeitsbereich bewegt.

Das würde bedeuten, dass der Vordruck auf der Stickstoffseite dem der maximalen Fallhöhe des Pumpspeichers angepasst werden muss. Dadurch würde sich das nutzbare Volumen der Behälter aber deutlich verkleinern, da die Pumpenseitige Obergrenze von 10bar erreicht würde, bevor die Membran die Stickstoffseite vollständig komprimiert.

Gleichzeitig muss im Turbinenbetrieb darauf geachtet werden, dass die Behälter nicht vollständig entleert und damit die Membran entspannt wird. Das ließe sich am sichersten und besten mit einem automatischen Ventil umsetzen, das durch einen Regler gesteuert wird, der durch die Laufzeit der Pumpen das ungefähre Volumen in den Behältern und mit dem Durchflussmesser auf der Turbinenseite abgleicht.

Die Membrangefäße sind also grundlegend nicht für die vorgesehene Betriebsweise ausgelegt und daher kann die bestmögliche Funktions- und Betriebsweise für die Behälter nicht vollständig festgelegt werden, sondern muss in Versuchen ausgetestet werden.

6. Auch wenn es sich bei den Pumpen um Membranpumpen mit mehreren Kammern handelt und sie laut Hersteller vor Rückströmungen geschützt sind, sollten diese vor Druckschlägen oder gegenläufiger Durchströmung gesichert werden. Sobald die gefüllte Anlage zum Turbinenbetrieb geöffnet wird, kann es, je nach Ventilsteuerung, zu Druckschlägen in der Anlage kommen, die bis zu den Pumpen zurücklaufen. Genauso könnte eine Erwärmung der Membrangefäße zu Überdrücken in der Anlage führen. Beides kann in der Konsequenz bedeuten, dass die Membranpumpen rückläufig durchströmt werden, was zu einer Beschädigung der Pumpen führen würde.

7. Im Datenblatt des Kaltwasserzählers sind keine Angaben über notwendige Ein- und Auslaufstrecken – sogenannte Beruhigungsstrecken – zu finden. Für eine korrekte Funktionsweise des Zählers sollte die Strömung möglichst ungestört und vor allem ohne Lufteinschlüsse sein. Für Durchflussmengenähler wie den verbauten Kaltwasserzähler werden in der Regel Beruhigungsstrecken von sechs bis zehnfachem Innendurchmesser der Rohrleitung am Einlauf und drei- bis fünffachem Durchmesser am Auslauf vorgegeben.

Da der Kaltwasserzähler im 25er-Rohrsystem verbaut wird, ergeben sich Beruhigungsstrecken von

$$BS_{ein} = 6 * d_{i,25} \text{ bis } 10 * d_{i,25} = 126\text{mm bis } 210\text{mm}$$

$$BS_{aus} = 3 * d_{i,25} \text{ bis } 5 * d_{i,25} = 63\text{mm bis } 105\text{mm}$$

8. Die Membrangefäße arbeiten wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben mit einem Stickstoff- oder Druckluftpolster. Der Vordruck dieses Polsters lässt sich relativ exakt voreinstellen. Wenn allerdings zusätzlich ein Gaspolster auf der Wasserseite der Membran entsteht, lässt sich der Anlagendruck nicht mehr über das Stickstoffpolster regulieren. Daher muss der Eintritt von Luft in die Anlage verhindert werden. Zusätzlich zu den Membrangefäßen hat auch der Kaltwasserzähler Schwierigkeiten mit Luft in der Anlage, da durch Luftblasen innerhalb der Wasserströmung das Zählwerk nicht sauber arbeiten kann.

Pumpenseitig soll der Lufteintritt durch eine automatische Entlüftung, die zwischen Rückschlagventil und Membrangefäßen montiert wird, verhindert werden. Turbinenseitig wird die Rückströmung von Luft in die Anlage durch einen Siphon zwischen Turbine und Kaltwasserzähler verhindert.

Wie aus Punkt 5 und Punkt 8 ersichtlich wird, sind die Membrangefäße für den gedachten Einsatzzweck nicht geeignet. Für eine längerfristig funktionsfähige Anlage müssen sie aus diesem Grund ausgetauscht werden.

Da es keine standardmäßigen Miniaturpumpspeicher mit Druckbehältern gibt, muss das Konzept des Behälters neu entwickelt und der Behälter dementsprechend konstruiert und gebaut werden. Diese Aufgabe war ursprünglich nicht Teil der Aufgabenstellung der zugrundeliegenden Arbeit, kann aber nicht umgangen werden. Die Behälter sind ein wesentliches Bauteil der Anlage, ohne das die Funktion der Anlage weder getestet noch gesteuert werden kann.

5.3 Neuaufbau der Anlage

Die Anlage wurde nicht nur neu aufgebaut, sondern auch ergänzt. Wie in Kapitel 5.1 erwähnt, fehlten für den Betrieb der Anlage sowohl Netzteile für die Stromversorgung der Pumpen als auch ein Widerstand als Last am Generator. Auch die Membrangefäße wurden gegen einen geeigneteren Druckbehälter ausgetauscht.

5.3.1 Konzeptionierung, Konstruktion und Fertigung des neuen Behälters

5.3.1.1 Konzepterstellung

Durch den Austausch der Behälter sollen nicht nur möglichst viele Nachteile der Membrangefäße behoben, sondern gleichzeitig möglichst viele weitere Vorteile für den Aufbau und den Betrieb der Anlage hinzugewonnen werden. Aus diesem Grund muss das Konzept des Behälters sorgfältig ausgearbeitet und an die Parameter der Anlage angepasst werden.

Die wichtigsten zu erfüllenden Punkte für den neuen Behälter sind:

1. Dauerfestigkeit/ Schutz vor Korrosion

Da es sich bei der Anlage um ein offenes System handelt (über das offene Becken, das als unteres Reservoir dient, reichert sich das Wasser immer wieder mit Sauerstoff an), besteht das Risiko der inneren Korrosion der einzelnen Anlagenkomponenten und vor allem des Druckbehälters. Um diesem Risiko vorzubeugen, wird der Behälter aus legiertem Stahl (1.4301, umgangssprachlich V2A) gefertigt. Da alle weiteren Anlagenkomponenten aus Kunststoff oder Messing bestehen, kann Korrosion damit ausgeschlossen werden.

2. Ausreichendes Volumen für notwendige Betriebsdauer

Das notwendige Volumen ist von zwei Faktoren abhängig: zum einen der geplanten Versuchsdauer und zum anderen dem Volumenstrom durch die Turbine.

Die Versuchsdauer sollte ein gesundes Mittel zwischen ausreichender Länge für Beobachtungen und Datenerfassung und einer direkt damit verbundenen Wartezeit während der Befüllung bilden. Zusätzlich sollte die Versuchsdauer nicht übermäßig in die Länge gezogen werden, da die Vielfalt an möglichen Ereignissen begrenzt ist und somit ab einer gewissen Dauer keine neuen Erkenntnisse in Form von Beobachtungen oder Daten zu erwarten sind.

Die Turbine kann laut Datenblatt (vgl. Tabelle 5-1) bei Drücken von 6bar bis 10bar (entspricht ca. 60m bis 100m Fallhöhe) mit dem gleichen Düsenquerschnitt genutzt werden. Das ist eine wichtige Voraussetzung, da während des Betriebs eine Veränderung des Düsenquerschnittes nur sehr schwer bis gar nicht praktikabel wäre. Aus diesem Grund sollte der Behälter nicht unter 6bar eingesetzt werden. Gleichzeitig sollte der durch die Pumpen maximal mögliche Druck von 10bar genutzt werden, da mit steigendem Druck die Leistungsausbeute der Turbine verbessert wird.

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Berechnung des Volumens ist die Lage des Wasseranschlusses für die Turbine. Dieser sollte am tiefsten Punkt des Behälters liegen, damit der Behälter vollständig entleert werden kann (z.B. für Transporte oder Wiederkehrende Prüfungen).

Der an der Unterseite angebrachte Wasseranschluss setzt dabei voraus, dass unterhalb des Behälters genug Platz ist, um diesen Anschluss zu montieren. Der Anschluss des Behälters sollte mindestens 100mm oberhalb der Aufstellfläche liegen. Auch die Anschlüsse auf der Oberseite des Behälters für Sicherheitsventile oder der Druckluftanschluss benötigen Platz. Damit reduziert sich die mögliche Höhe des reinen Behälters auf circa 530mm (vgl. Punkt 4). Aufgrund der Abmessungen des Wagens bietet sich ein liegender Behälter an, da so am besten das nahezu quadratische Seitenverhältnis von Höhe zu Tiefe genutzt werden kann. Somit entspricht die Behälterhöhe dem gewählten Durchmesser und die Behälterbreite der Höhe des gewählten Schusses und der Böden.

Um Kosten für den Behälter zu sparen, sollten Normteile verwendet werden. Bei den notwendigen Böden empfiehlt es sich also auf Klöpperböden in Normgrößen nach der DN-Einstufung zurückzugreifen. Da sich der Außendurchmesser von Bauteilen in DN500 bereits auf 521mm beläuft, wäre diese Größe zu knapp an den maximalen Werten dimensioniert. Kleinere Abweichungen könnten dann bereits zu erheblichen Problemen führen.

Aus diesem Grund wird für den Behälter ein Außendurchmesser von 457mm gewählt. Das entspricht der Einheitsgröße DN450.

Da an den Seiten des Behälters keinerlei Einbauten notwendig sind, kann hier die gesamte Breite des Wagens ausgenutzt werden. Bei einer Höhe von ungefähr 110mm pro Klöpperboden kann der Schuss des Behälters bis zu 900mm hoch beziehungsweise breit werden. Damit würde sich eine Gesamtbreite von 1120mm ergeben, bei der an den Seiten noch genug Abstand bis zu den Kanten des Wagens ist um den Behälter ohne größere Umstände montieren zu können.

Unter Berücksichtigung dieser Bedingungen und der sich daraus ergebenden Maße ergibt sich ein Gesamtvolumen des Behälters von

$$\begin{aligned} V_{DB,ges} &= 2 * V_{Kl\ddot{o}pper} + V_{Zarge} = 2 * 12,1l + \frac{\pi}{4} * (457 - 2 * 5mm)^2 * 900mm \\ &= 2 * 12,1l + 141,24l = 165,44l \end{aligned}$$

Um ein Leerlaufen des Behälters zu verhindern, sollte eine Mindestfüllstandhöhe von 30mm nicht unterschritten werden. Ausgehend von dem sich daraus ergebenden Volumen und einem Arbeitsbereich von 6bar bis 10bar, ergibt sich ein Arbeitsvolumen von circa 65l (vgl. Anhang 1: Berechnung des Behältervolumens). Diese Volumendifferenz entsteht durch eine Füllstandänderung von 30mm bis circa 225mm. Es wird ausschließlich die untere Hälfte des Behälters gefüllt, während die obere Hälfte als Druckspeicher dient (vgl. Punkt 5).

Als letzter Punkt sei angefügt, dass das berechnete Volumen auch ungefähr dem in Kapitel 5.1.1.2 vorausgesetzten Volumen entspricht, wodurch eine erneute Berechnung der ursprünglichen Werte nicht notwendig ist.

3. Betriebsfestigkeit/ Schutz vor Schäden durch fehlerhafte Bedienung

Die Betriebsfestigkeit von einfachen Druckbehältern ist durch die Tatsache gewährleistet, dass Druckbehälter nach Druckgeräterichtlinie und dem AD2000-Regelwerk ausgelegt werden. Diese Auslegung sieht eine Berechnung anhand der maximalen Betriebsdrücke vor und überprüft zusätzlich die notwendige Drucküberschreitung für vorgeschriebene Festigkeitsprüfungen (Druckproben). Die entsprechende Berechnung ist unter Kapitel 5.3.1.4 zu finden. Die Dauerfestigkeit von Druckbehältern wird anhand des AD2000-Merkblattes S1 berechnet.

Um fehlerhafter Bedienung vorzubeugen, muss jedes Druckgerät über eine vom Hersteller erstellte Bedienungsanleitung verfügen. In dieser Bedienungsanleitung finden sich alle Maßnahmen zur Vorbeugung fehlerhafter Bedienung. Solange diese Vorgaben eingehalten werden, können fehlerhafte Bedienung und daraus entstehende Schäden weitestgehend ausgeschlossen werden.

4. Montierbarkeit auf dem Wagen des Modells

Der Versuchsstand wurde aus Gründen der Mobilität des Modells auf einem beweglichen Wagen montiert. Die oberste Ebene bietet dabei Platz für den Druckbehälter. Damit der Aufbau durch Türen passt und mit dem Fahrstuhl transportiert werden kann, darf eine Gesamthöhe von zwei Metern nicht überschritten werden. Die oberste Ebene hat eine Höhe von ungefähr 1,25m, womit ein Aufbau maximal 750mm hoch sein darf. Um die Anlage besser transportieren zu können, wird eine maximale Höhe für alle Aufbauten von 730mm festgelegt. Die Grundfläche des Wagens hat auf allen Ebenen ungefähr eine Größe von 0,74m² (600x1230mm). Aufgrund der seitlichen Begrenzungen des Wagens muss der Behälter auf dieser Grundfläche Platz finden.

5. Kombinationsmöglichkeit von Druckluft und Wasser zur Druckspeicherung

Da eine Druckspeicherung mit Wasser nicht funktionieren würde (inkompressibles Fluid), muss Luft als Speichermedium für den Druck genutzt werden. Also muss am Behälter eine Anschlussmöglichkeit für Druckluft geschaffen werden, die idealerweise oben am Behälter angebracht wird, um ein Ausströmen von Wasser während der Befüllung mit Druckluft zu vermeiden.

6. Stutzen zur Montage von Messinstrumenten, Sicherheitseinrichtungen und Versorgungsleitungen

Um später mehr und besser Messergebnisse von der Anlage zu bekommen, ist eine Füllstandmessung für den Behälter von Vorteil. Von den verschiedenen Messmethoden, die eingesetzt werden können, eignet sich für diesen Behälter nur eine Bypassmessung mit Schwimmer. Für Ultraschallsensoren sind die Anlagendrucke zu hoch und die notwendigen Aufbauten wären zu hoch für den geplanten Behälter. Ein Drucksensor wäre ebenfalls schwierig, da der Druck der Anlage nicht nur durch hydrostatischen Druck zu Stande kommt, sondern vor allem durch die Funktionsweise als Druckspeicher. Ein Vibrationssensor („Liquiphant“) wäre an sich denkbar, allerdings müssten zur kontinuierlichen Füllstandmessung mehrere Sensoren eingesetzt werden, die wiederum einen erhöhten Umfang an Messtechnik nach sich ziehen würden.

Eine Bypassmessung ist demnach die beste Lösung. Daher werden zwei Flanschanschlüsse für den Anschluss des Bypasses vorgesehen.

Auch wenn die Pumpen durch die integrierte Selbstabschaltung einen Überdruck des Behälters verhindern, könnte durch die Zuständige Überwachungsstelle (kurz ZÜS) ein Sicherheitsventil als Berstschutz gefordert werden. Aus diesem Grund wird ein separater Stutzen dafür vorgesehen.

Zu den erwähnten Anschlüssen für ein mögliches Sicherheitsventil und der Bypass-Füllstandmessung kommen zwei weitere Anschlüsse hinzu. Wie erwähnt werden im Behälter Wasser und Druckluft kombiniert, um die Energiespeicherung zu ermöglichen. Für beide Medien müssen eigene Anschlüsse geschaffen werden.

5.3.1.2 Einstufung nach Druckgeräterichtlinie und Betriebssicherheitsverordnung

Druckbehälter (geschlossene Behälter mit einem Überdruck von mehr als 0,5bar) müssen in Deutschland nach Druckgeräterichtlinie (ab hier abgekürzt mit DGRL) eingestuft werden. Dabei geht es um die Beurteilung möglicher Gefährdungen durch den Behälter und die zur Vermeidung dieser Gefährdungen zu treffenden Vorkehrungen und Prüfungen. Im Wesentlichen werden Behälter anhand von vier Kriterien (DGRL Absatz 4) eingestuft:

1. Gefährliche oder ungefährliche Medien (Fluidgruppe 1 (gefährlich) und Fluidgruppe 2 (nicht Fluidgruppe 1))
2. Flüssige oder Gasförmige Medien
3. Druck (maximal zulässiger Betriebsüberdruck)
4. Volumen

Anhand dieser vier Kriterien lässt sich der Behälter in einem Diagramm (DGRL Anhang 2) einer der Kategorien der DGRL zuordnen. In diesem Fall handelt es sich bei Wasser beziehungsweise Druckluft um Fluide der Gruppe 2. Da Druckluft gasförmig ist, muss von gasförmigen Medium ausgegangen werden. Damit muss folgendes Diagramm verwendet werden:

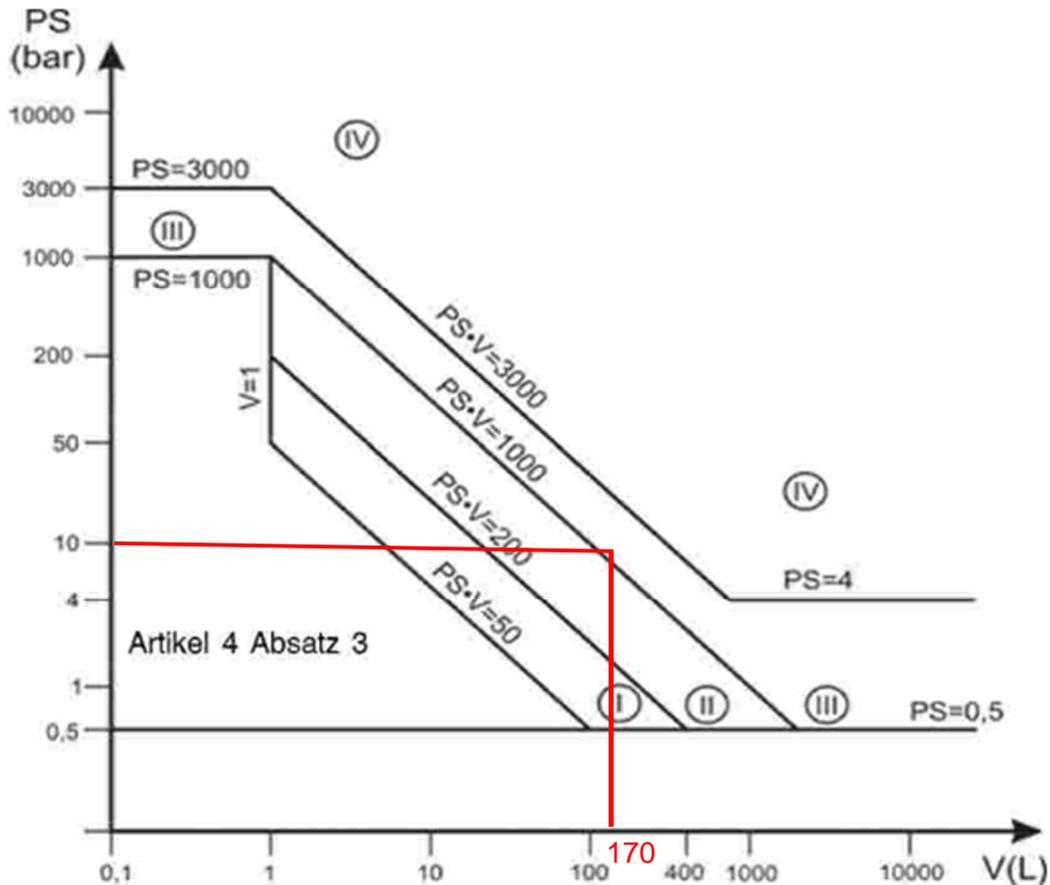


Abbildung 5-9: DGRL, Anhang II, Diagramm 2
Quelle: Druckgeräterichtlinie

Prüfgruppe	Grenzen PS · V [bar · Liter]	Prüfung vor Inbetriebnahme	Wiederkehrende Prüfung	
			Innere Prüfung	Festigkeitsprüfung
I	PS > 0,5 und 50 < PS · V ≤ 200	bP	bP	bP
II	PS > 0,5 und 200 < PS · V ≤ 1000	ZÜS	bP	bP
III	PS > 0,5 und 1000 < PS · V ≤ 3000	ZÜS	ZÜS	ZÜS
IV	PS > 0,5 und PS · V > 3000	ZÜS	ZÜS	ZÜS

Abbildung 5-10: Kategorien der DGRL

Quelle: Vortrag „BetrSichV Druckgeräte / Rohrleitungen, Gültig ab 01.06.2015“, TÜV Rheinland Industrie Service GmbH

Wie in Abbildung 5-10 dargestellt gelten für die unterschiedlichen Kategorien (hier Prüfgruppen) unterschiedliche Voraussetzungen. Dabei steht „ZÜS“ für die „Zuständige Überwachungsstelle“ (beispielsweise der „TÜV Nord“) und „bP“ für eine „befähigte Person“. Die Intervalle der Wiederkehrenden Prüfungen können dabei variieren. In der Regel muss die innere Prüfung alle 5 Jahre stattfinden, die Festigkeitsprüfung dagegen nur alle 10 Jahre. Für bestimmte Medien wird auch eine äußere Prüfung im 2-Jahres-Intervall notwendig.

Die angegebenen Grenzen variieren je nach Medium und Aggregatzustand.

Die notwendigen Wiederkehrenden Prüfungen sowie die dazugehörigen Intervalle werden in der Betriebsanweisung des Behälters festgehalten. Diese muss vom Hersteller erstellt werden und ist für die Verwendung des Behälters bindend (vgl. Anhang 4: Betriebsanleitung Druckspeicherbehälter).

5.3.1.3 Zerstörungsfreie Prüfungen (ZfP, Quelle [34])

Zerstörungsfreie Prüfungen (kurz ZfP) dienen zur Überprüfung eines Bauteils, ohne dieses in seiner gebrauchts- oder Funktionsfähigkeit einzuschränken. Bei den Prüfungen wird eine Aussage über den Ist-Zustand des Bauteils getroffen, auf dessen Grundlage weitere Aussagen über das Bauteil getroffen werden können. Zu den zerstörungsfreien Prüfungen gehören:

- Sichtprüfung
- Eindringprüfung
- Magnetpulverprüfung
- Dichtheitsprüfung
- Wirbelstromprüfung
- Durchstrahlungsprüfung
- Ultraschallprüfung

Zur Überprüfung eines Bauteils sind in der Regel nicht alle Prüfverfahren notwendig. Daher muss die Auswahl der Prüfverfahren umso besser sein, da sich nicht alle Verfahren gleichermaßen für bestimmte Prüfungen eignen. Für die Prüfung des Behälters werden in erster Linie Durchstrahlungsprüfungen verwendet. Zusätzlich ist das verwendete Blech für die Behälterzarge vom Hersteller bereits einer Ultraschallprüfung unterzogen worden.

Durchstrahlungsprüfung

Bei der Durchstrahlungsprüfung werden einzelne Bereiche des Bauteils mit Röntgenstrahlen bestrahlt. Dieser Bereich wird dann auf einem radiologischen Film dargestellt. Die Durchstrahlungsprüfung dient in erster Linie der Überprüfung von Schweißnähten. Dabei geht es um das Detektieren von Schweißnahtunregelmäßigkeiten im Nahtinnern. Ab wann eine solche Unregelmäßigkeit versagenskritisch ist, wird vom Prüfer beurteilt.

Am besten werden dabei voluminöse Unregelmäßigkeiten wie Schlackeeinschlüsse oder Poren sichtbar. Generell lassen sich Unregelmäßigkeiten, die in Durchstrahlungsrichtung verlaufen, am besten erkennen. Dopplungen und Flankenbindefehler (wenn sich das Schweißgut am Rand der Schweißnaht nicht mit dem Grundmaterial verbindet) sind auf den Röntgenfilmen meist nur schwer zu erkennen. Allgemein können die meisten schweißnahttypischen Unregelmäßigkeiten mit der Durchstrahlungsprüfung gefunden werden. Daher wird sie häufig für die Überprüfung von Schweißnähten eingesetzt.

Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfung dient vor allem der Untersuchung des verwendeten Materials. Sie ist deutlich schneller und flexibler als die Durchstrahlungsprüfung und kann größere Flächen abdecken. Mit der Ultraschallprüfung können flächige Unregelmäßigkeiten wie Dopplungen oder Risse (daher häufig auch als Dopplungsprüfung bezeichnet) besonders gut detektiert werden. Die Ultraschallprüfung ergänzt sich daher sehr gut mit der Durchstrahlungsprüfung.

Festigkeitsprüfung

Die Festigkeitsprüfung (bei Druckbehältern in der Regel eine Wasserdruckprobe) gehört im ursprünglichen Sinn nicht zu den zerstörungsfreien Prüfungen, da sie durchaus Schäden am Bauteil verursachen kann. Ein solcher Schaden geht mit dem Nichtbestehen der Festigkeitsprüfung einher, weshalb es sich im Falle einer positiven Festigkeitsprüfung im wörtlichen Sinne um eine zerstörungsfreie Prüfung handelt.

Die Druckproben dienen in der Regel zur statischen Überprüfung der Festigkeit gegenüber dem vorgesehenen Betriebsdruck. Bei längeren Standzeiten kann eine Druckprobe zusätzlich als Dichtheitsprüfung genutzt werden.

5.3.1.4 Berechnung der wesentlichen Behälterkomponenten

Der Behälter besteht aus einem Schuss, der wahlweise aus einem Rohrzuschnitt oder einem gewalzten und verschweißten Blechzuschnitt gefertigt ist. Den Boden und Deckel beziehungsweise die offenen Enden des Schusses bilden Böden, die es in verschiedenen Formen gibt. Aufgrund des häufigen Einsatzes und daraus resultierenden geringen Kosten für Anschaffung und Verarbeitung werden für diesen Behälter Klöpperböden gewählt.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil eines Behälters sind die Füße, auf denen der Behälter steht. Sie müssen sowohl das Gewicht tragen wie auch ein Umkippen oder Wegrollen des Behälters verhindern. Zusätzlich geben sie den notwendigen Raum auf der Unterseite des Behälters, um dort notwendige Anbauten montieren zu können.

Die weiteren Anbauten des Behälters sind Anschlussstutzen in Form von Muffen oder Flanschen, die in der Regel auf das Blech des Schusses oder auf die Böden aufgesetzt (bzw. eingesetzt) werden.

Die Länge des Behälterschusses ist vor allem vom notwendigen Volumen abhängig. Dabei gilt es ein möglichst gut passendes Verhältnis von Durchmesser und Länge zu finden. Dies kann anhand der notwendigen Volumenvorgaben berechnet werden (vgl. Kapitel 5.3.1.1 Punkt 2). Zusätzlich muss die Wandstärke des Behälters berechnet werden. Diese wird mittels der Kesselformel – auch Würstchenformel genannt – berechnet.

$$s_{min} = \frac{D_a * PS}{20 * \frac{K}{S} * v + PS} + c_1 + c_2 \quad (12)$$

Nach den zuständigen AD2000-Merkblättern (B und W) ergeben sich folgende Werte für den Behälter:

Tabelle 5-2: Übersicht der Werte zur Berechnung der erforderlichen Mindestwandstärke

D_a	457mm (DN450)
PS	10 bar(Ü)
K (20°C)	230 MPa
S	1,5
v	0,85
c_1	0,3mm
c_2	0mm

Quelle: Eigene Darstellung

Der Außendurchmesser D_a ergibt sich anhand des unter Kapitel 5.3.1.1 Punkt 2 berechneten Behältervolumens und der unter Punkt 4 aufgezeigten räumlichen Umgebungsbedingungen. Der zulässige maximale Betriebsüberdruck ergibt sich anhand der verwendeten Pumpen, die über eine integrierte Notabschaltung bei knapp über 10bar (bzw. 150psi) verfügen. Der Festigkeitskennwert K kann den ADW Merkblättern für den verwendeten Stahl (1.4301) entnommen werden. Da der Prozess keine Hitzequelle darstellt und die Medien bei Raumtemperatur gelagert werden, kann für den Gesamtprozess Raumtemperatur angenommen werden, wodurch auch für die Berechnung des Behälters Raumtemperatur als Betriebstemperatur angenommen werden kann. Für gewalzten Stahl findet sich in den ADB-Merkblättern ein Sicherheitsbeiwert S von 1,5. Der Schweißnahtfaktor v wird für diesen Behälter auf 0,85 gesetzt, um den notwendigen Prüfumfang möglichst gering zu halten.

Ein Schweißnahtfaktor von 1 würde bedeuten, dass die Schweißnähte die gleiche Festigkeit wie das Blech besitzen und keinerlei Schwächung darstellen. Um dies sicherzustellen, müssten alle Schweißnähte aufwendig geprüft werden. Durch den geringeren Faktor kann der Prüfaufwand deutlich reduziert werden, ohne die notwendige Wandstärke unnötig stark zu erhöhen.

Die Zuschläge c_1 und c_2 beziehen sich auf die fertigungsbezogene beziehungsweise betriebsbedingte Abweichung von der berechneten Wandstärke. Die Fertigungstoleranzen für Bleche bis 5mm Stärke belaufen sich auf bis zu 0,3mm Unterschreitung des angegebenen Maßes. Deshalb muss das verwendete Material mindestens 0,3mm stärker sein als berechnet. Der sogenannte Abnutzungszuschlag c_2 bezieht sich vor allem auf korrodierende Materialien und kann aufgrund der Beständigkeit des verwendeten Stahls gegen die genutzten Medien (Wasser und Druckluft) zu 0 gesetzt werden.

Somit ergibt sich eine Mindestwandstärke für den Behälter von:

$$s_{min} = \frac{457mm * 10bar}{20 * \frac{230MPa}{1,5} * 0,85 + 10bar} + 0,3mm = 2,05mm$$

Anhand dieses Wertes würde für den Behälter mindestens eine Wandstärke von 3mm gewählt. Da es sich bei der Anlage um eine Versuchsanlage handelt, die auch von nicht geschulten Personen bedient wird, wird als zusätzliche Sicherheit eine Wandstärke von

$$s = 5mm$$

gewählt. Die Form von Klöpperböden wird in der DIN 28011 vorgegeben.

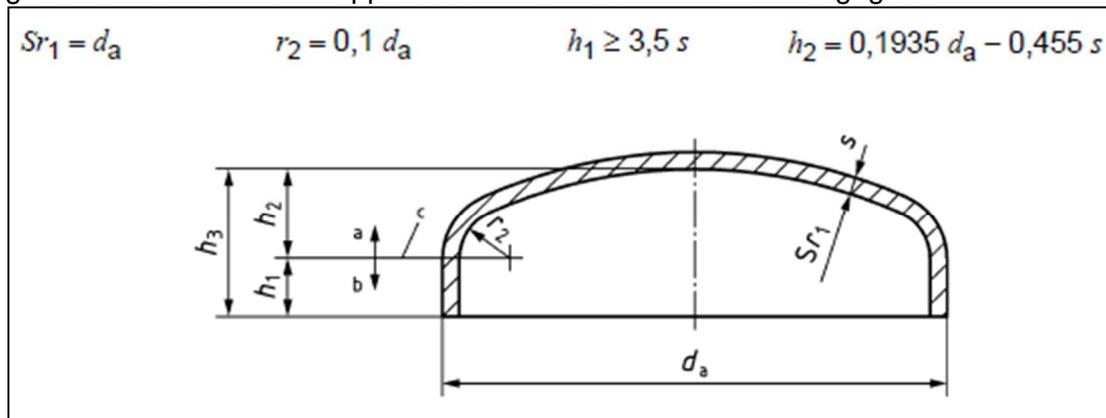


Abbildung 5-11: Maße Klöpperboden

Quelle: DIN 28011:2012-06

Mit dem gewählten Außendurchmesser von 457mm ergeben sich folgende Werte für die Maße des Klöpperbodens:

$$\begin{aligned} Sr_1 &= d_a = 457mm \\ r_2 &= 0,1d_a = 0,1 * 457mm = 45,7mm \\ h_1 &\geq 3,5s = 3,5 * 5mm = 17,5mm \end{aligned}$$

Für das Maß h_1 werden 20mm gewählt (Fertigungsstandard).

$$h_2 = 0,1935d_a - 0,455s = 0,1935 * 457mm - 0,455 * 5mm = 86,1545mm \approx 86mm$$

Das Volumen des Klöpperbodens ergibt sich laut DIN 28011 zu

$$V_{Kl\ddot{o}pper} \approx 0,1 * (d_a - 2s)^3 = 0,1 * (457mm - 2 * 5mm)^3 = 8.931.462 mm^3 \approx 9l$$

Laut Angabe des Herstellers haben die Bauteile jeweils ein Volumen von circa 12,1l. Diese Angabe weicht zwar deutlich von dem berechneten Wert ab, ist aber verlässlicher als der hier berechnete Wert. Daher wird im weiteren Verlauf der Berechnungen von einem Volumen von 12,1l pro Klöpperboden ausgegangen.

Die Abweichung entsteht wahrscheinlich durch die festgelegte Höhe h_1 von 20mm. Nach DIN 28011 müsste diese Höhe mindestens das 3,5-fache der Wandstärke s sein, was nur 17,5mm entspricht.

Normalerweise werden liegende Behälter auf Sattellager montiert. Dies gilt aber vor allem für große industrielle Behälter. Die Behälterfüße werden trotzdem nach „AD2000-Merkblatt S3/2“

berechnet („Allgemeiner Standsicherheitsnachweis für Druckbehälter; Nachweis für liegende Behälter auf Sätteln“). Unter Punkt 4.1 des Merkblattes findet sich ein „Überschlägiger Tragfähigkeitsnachweis“. Werden die dort vorgegebenen Grenzen bestimmter Berechnungsparameter eingehalten, kann ein ausführlicher Nachweis der Behälterfüße entfallen (vgl. Anhang 2: Berechnung der Behälterfüße nach AD2000-Merkblatt S 3/2). Eine der Grenzen bezieht sich auf die Breite der Füße:

$$b_1 \geq 1,1 * \sqrt{D * e} = 1,1 * \sqrt{457\text{mm} * 5\text{mm}} = 52,6\text{mm}$$

Die nächsten Einheitsgrößen für Formstahl sind Rohr in Nennweite DN50, was einem Außendurchmesser von 60,3mm entspricht, oder Vierkantrohr mit 60mm Kantenlänge. Diese Füße würden den Platz für die Montage von Anbauteilen unterhalb des Behälters stark einschränken und wären gleichzeitig um fast 20% überdimensioniert. Daher wird ein Vierkantrohr mit 40mm Kantenlänge angenommen und ein ausführlicher Nachweis geführt (vgl. Anhang 2: Berechnung der Behälterfüße nach AD2000-Merkblatt S 3/2). Dieser Nachweis ergibt, dass auch Behälterfüße mit 40mm Breite mehr als ausreichend sind.

Am Behälter werden nicht nur die Anschlüsse für Wasser und Druckluft benötigt. Zusätzlich werden weitere Stützen für die Installation eines Sicherheitsventils (1 Stutzen 1“-Gewinde, Oberseite) und zwei weitere Stützen für die Installation der Füllstandmessung (2 Stutzen Flansch DN25, horizontal, Ober- und Unterseite) vorgesehen.

Die Fertigungszeichnung des Behälters wird mit Hilfe eines CAD-Programms zunächst als 3D-Modell erstellt. Aus diesem Modell kann anschließend eine Zeichnung abgeleitet werden.

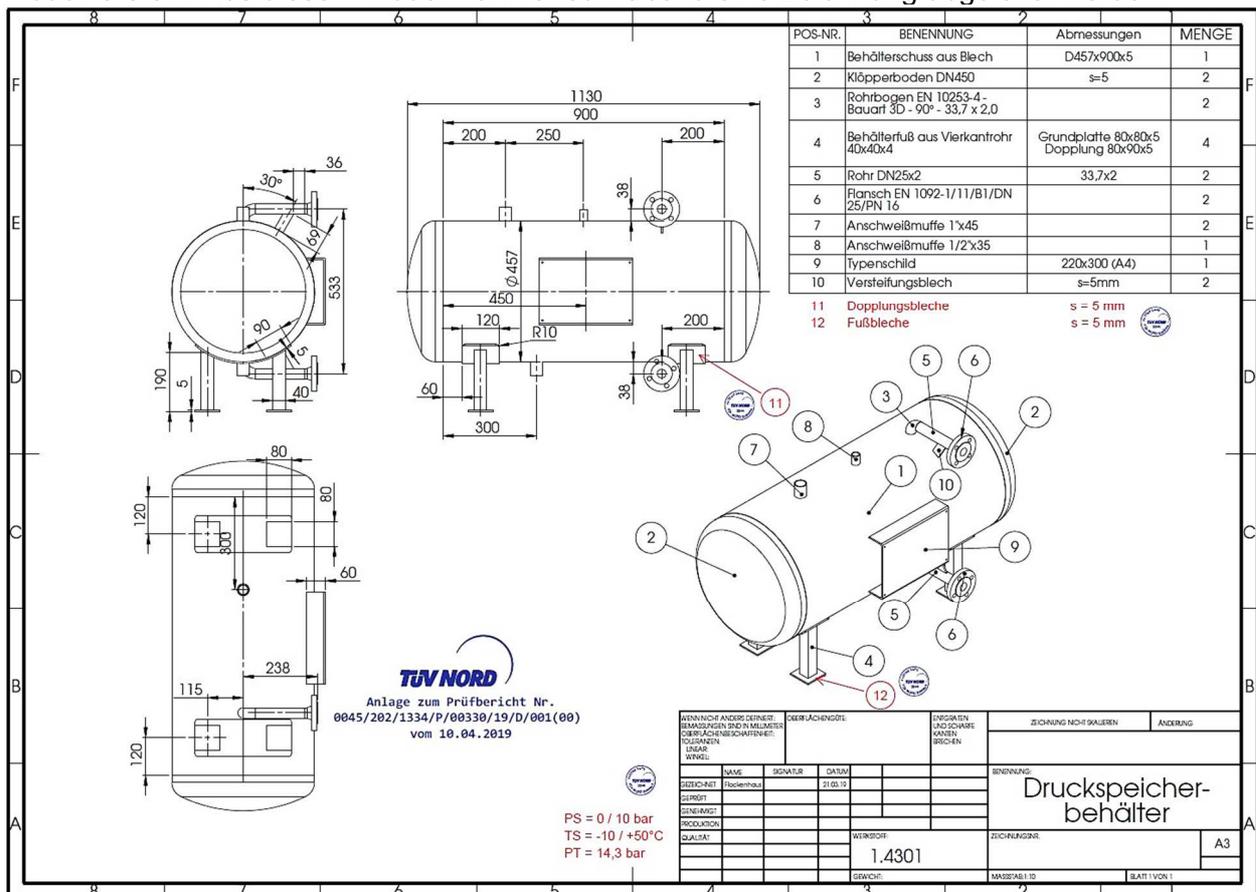


Abbildung 5-12: Fertigungszeichnung des Behälters inkl. TÜV-Abnahme nach Vorprüfung
Quelle: Eigene Darstellung (Anhang 3)

Die Dauerfestigkeit eines Behälters nach AD2000-Merkblatt S1 kann nach Abschnitt 1.4 Absatz a vernachlässigt werden, wenn die Anzahl der Lastwechsel kleiner als 1000 ist. Gleichzeitig dient diese Berechnung nur zur Anpassung der Prüfintervalle (vgl. Kapitel 5.3.1.6), falls die berechnete zulässige Anzahl an Lastwechseln vor dem Erreichen einer Prüfung überschritten wird. Bei dem

hier ausgelegten Behälter ist das nicht der Fall, da von folgenden Lastwechselzahlen ausgegangen wird:

Tabelle 5-3: Voraussichtliche Lastwechselzahlen des Behälters

Einstellung der Anlage im Rahmen dieser Arbeit	ca. 150 bis 200 Lastwechsel
Weitere Anpassung der Anlage im Rahmen folgender Arbeiten	ca. 100 Lastwechsel
Versuche an der Anlage im Rahmen des Smart Grid	ca. 5 Lastwechsel pro Versuch

Quelle: Eigene Darstellung

Die ersten beiden Punkte der Tabelle werden voraussichtlich im Laufe des ersten Jahres nach Inbetriebnahme des Behälters abgeschlossen sein. Danach werden die Versuche gestartet. Es wird davon ausgegangen, dass pro Semester fünf bis zehn Versuche an der Anlage durchgeführt werden und zusätzlich in der vorlesungsfreien Zeit weitere zehn Versuche pro Jahr. Damit würden sich 150 Lastwechsel pro Jahr ergeben. Woraus folgende Lastwechselzahlen für die nächsten Jahre nach der Inbetriebnahme berechnet werden können:

Tabelle 5-4: Kumulierte Lastwechselzahlen in den folgenden Jahren

Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lastwechsel	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500	1650

Quelle: Eigene Darstellung

Zur ersten wiederkehrenden Prüfung nach fünf Jahren (orange markiert: innere Prüfung) wären also ungefähr 100 Lastwechsel übrig. Bei dieser Prüfung muss dann überprüft werden, ob der Behälter weiteren Lastwechseln standhält und wie die weiteren Prüfintervalle (rot markiert: Festigkeitsprüfung) und Prüfumfänge festzulegen sind (vgl. Anhang 4: Betriebsanleitung Druckspeicherbehälter).

Auf eine exakte Auslegung der Dauerfestigkeit des Behälters nach AD2000-Merkblatt S2 wurde verzichtet, da der Umfang unverhältnismäßig zum Umfang dieser Arbeit wäre. Zusätzlich kann durch die Überdimensionierung der Wandstärke des Behälters davon ausgegangen werden, dass weit mehr als die 1000 zulässigen Lastwechsel möglich sind. Darüber hinaus zeigt die oben angeführte Vergleichsrechnung, dass die zulässigen Lastwechsel nicht vor der ersten wiederkehrenden Prüfung erreicht werden.

5.3.1.5 Beschreibung des Fertigungsverfahrens

Die Fertigung des Behälters erfolgt von Hand in der Werkstatt eines Fachbetriebes (Knaack & Jahn GmbH). Dazu wird die Zarge zunächst aus einer Blechtafel zurechtgeschnitten und in Form gewalzt. Anschließend wird die Längsnaht verschweißt. Der zweite Schritt ist das Einbringen der vorgesehenen Stützen. Solange die Böden noch nicht montiert sind können die Schweißnähte zusätzlich von innen mit Formiergas beaufschlagt werden. Außerdem können die Nähte nach dem Schweißen optisch überprüft und, falls notwendig, nachbearbeitet werden (schleifen, beizen, etc.).

Sind die Stützen eingebracht, werden die Klöpperböden ausgerichtet und angeschweißt. Zuletzt werden die Füße und die dazugehörigen Dopplungsbleche am Behälter angeschweißt.

Nach der Fertigung erfolgt die zerstörungsfreie Prüfung durch ein unabhängiges Unternehmen (Durchstrahlungsprüfung durch „Applus RTD“) und am Ende die Abnahme durch die zuständige Überwachungsstelle (kurz ZÜS, z.B. „TÜV Nord“).

Am Ende der Fertigung wird der gesamte Behälter gebeizt, um Anlauffarben an den Schweißnähten zu entfernen, da diese die Korrosionsbeständigkeit des Behälters beeinträchtigen.

5.3.1.6 TÜV-Abnahme und wiederkehrende Prüfung

Laut Druckgeräte-Richtlinie müssen Druckbehälter der Kategorie III durch eine benannte Stelle, auch ZÜS (zuständige Überwachungsstelle) genannt, abgenommen werden. Diese Abnahme kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Nicht in Serie gefertigte Behälter, die für spezielle Fälle konstruiert werden, werden nach Modul B1 und F abgenommen.

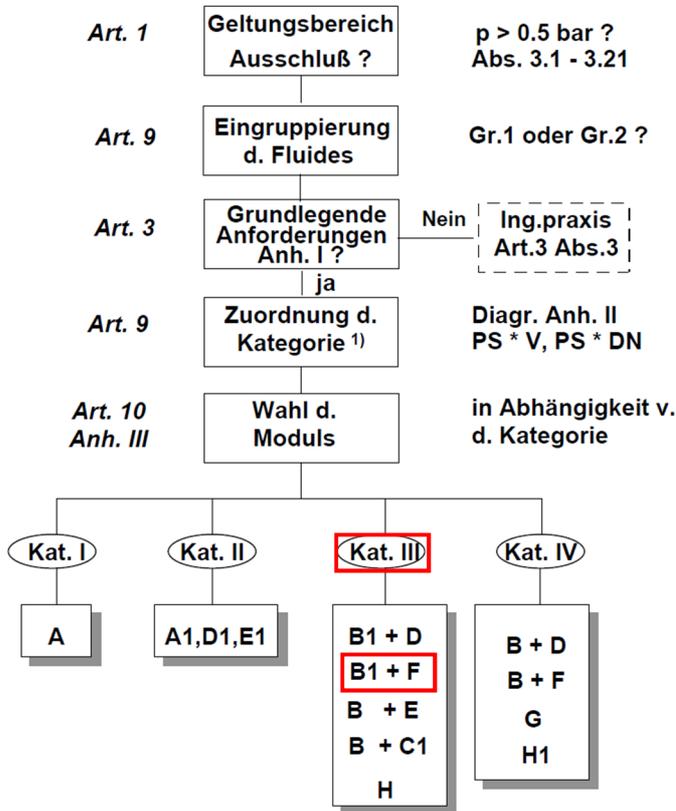


Abbildung 5-13: Ablaufdiagramm zur Modulwahl (DGRL)

Quelle: F. Neuwieser, H. Marchner, München: Die Module der Druckgeräte-Richtlinie - Ein neues Prüfkonzept für die Herstellung von Druckgeräten

Modul B1 ist die Entwurfsprüfung durch die ZÜS. Bei diesem Behälter wird sie anhand der Fertigungszeichnung durch den TÜV Nord durchgeführt. Das Modul B entspricht der eigentlichen Abnahme des Behälters, die in diesem Fall durch eine Überprüfung der Dokumentationsunterlagen und einer in Anwesenheit des Sachverständigen durchgeführte Druckprüfung erfolgt. Der Prüfdruck dafür berechnet sich nach DGRL für nicht warmgehende Behälter zu

$$p' = PS * 1,43 = 10bar * 1,43 = 14,3bar$$

Laut Betriebssicherheitsverordnung (ab hier abgekürzt mit: BetrSichV) unterliegen alle Druckgeräte (geschlossene Anlagenteile mit einem Überdruck von mehr als 0,5 bar) der Überwachungs- und Prüfpflicht durch den Betreiber. Wie genau einzelne Druckgeräte zu überwachen und zu prüfen sind, ergibt sich anhand verschiedener Randbedingungen. Ausschlaggebend sind, genau wie für die Einstufung nach DGRL, das Produkt aus Druck in bar und Volumen in Liter, der Aggregatzustand des Mediums und die Gruppe des Fluides (gefährlich/ungefährlich).

Der geplante Druckbehälter muss laut BetrSichV, Anhang 2, Abschnitt 4, Tabelle 3 sowohl vor Inbetriebnahme wie auch wiederkehrend durch die ZÜS geprüft werden (vgl. Abbildung 5-10). Die Prüfung vor Inbetriebnahme dient zum einen der Kontrolle der fachgerechten Einbringung des Druckgerätes in die Anlage, zum anderen der Überprüfung der für die Abnahme angenommenen Umgebungsbedingungen und deren Bewertung (bspw. Wind- und

Schneelasten). Die wiederkehrende Prüfung beinhaltet eine äußere Prüfung (2-Jahres-Intervall), eine innere Prüfung (5-Jahres-Intervall) und eine Festigkeitsprüfung (10-Jahres-Intervall). Die äußere Prüfung kann in bestimmten Fällen entfallen, wenn die Bedingungen nach BetrSichV, Anhang 2, Abschnitt 4, Nummer 5.6 erfüllt sind. Diese Bedingungen werden bei dem geplanten Behälter erfüllt.

Sowohl die für die Abnahme notwendige Dokumentation, wie auch die dazugehörige Betriebsanleitung finden sich im Anhang 5: Dokumentation Druckspeicherbehälter.

5.3.2 Umbau und Anpassung der Komponenten

Die beiden Membrangefäße wurden gegen den neuen Druckspeicherbehälter ausgetauscht. Damit wurde ein wesentliches Bauteil der Anlage verändert. Die Auswirkungen auf das hydraulische System sind dabei verhältnismäßig gering. Statt zwei separaten Behälteranschlüssen gibt es jetzt nur noch einen. Außerdem wurden die Platzverhältnisse verändert, wodurch die Rohrleitungsführung angepasst werden muss. Im Wesentlichen kann das Manometer nicht mehr an der Rückwand der oberen Ebene montiert werden, da es durch den Behälter verdeckt würde und somit nicht mehr ablesbar wäre.

Des Weiteren wurden folgende unter Kapitel 5.2 aufgeführte Optimierungsvorschläge umgesetzt:

1. Der Algenbildung soll durch den Einsatz vollentsalzten Wassers vorgebeugt werden. Sollten sich dadurch nicht die gewünschten Ergebnisse erzielen lassen, muss auf ein chemisches Algizid (wie sie z.B. für Aquarien oder Hausspringbrunnen genutzt werden) zurückgegriffen werden.
2. Dem Wasserverlust am Turbinengehäuse soll eine fachgerechte Abdichtung mit Dichtstreifen aus KlingerSil C4400 (2mm stark) vorgebeugt werden. Gegen den unkontrollierten Wasseraustritt aus der Turbine wird ein Trichter aus Edelstahl angefertigt (vgl. Abbildung 5-14).

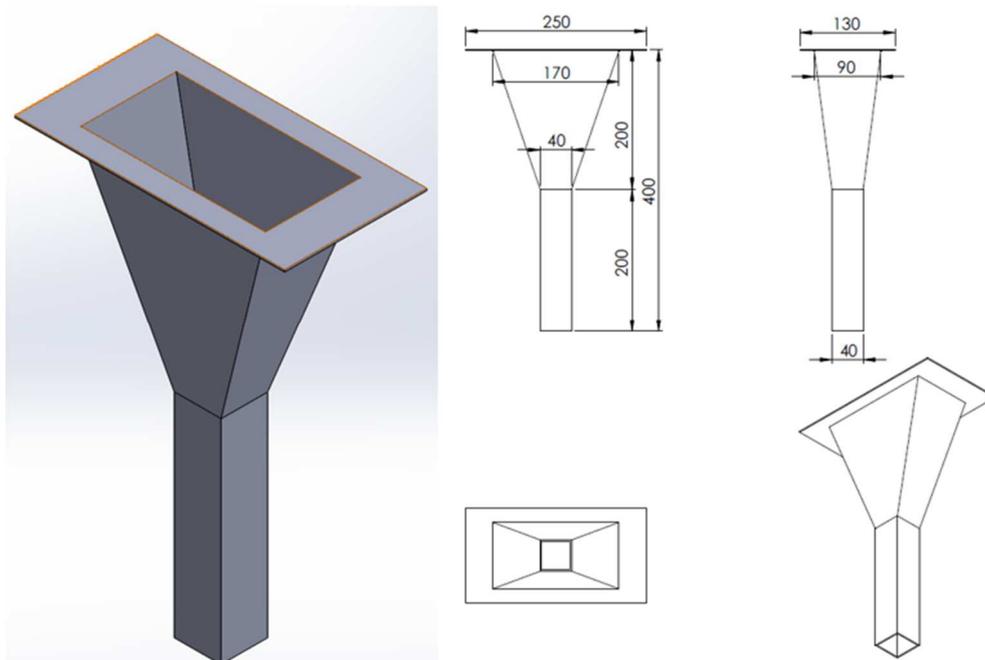


Abbildung 5-14: 3D-Modell und Maßzeichnung des Trichters
Quelle: Eigene Darstellung

3. Ein Umbau des Sammlers ist durch die verhältnismäßig großen Anbaulängen der Formteile des TECElogo-Systems nicht möglich. Die räumlichen Voraussetzungen bieten keine Möglichkeit, größere Durchmesser einzusetzen, da die zusätzlich notwendigen Reduzierungen zu weit ausbauen würden. Aus diesem Grund wird auf

- eine Anpassung des Sammlers verzichtet. Zumal die Auswirkungen und der gewünschte Effekt nicht eindeutig vorhergesehen werden können (vgl. Kapitel 5.1.1.7).
4. Der neue Druckspeicherbehälter wurde speziell für diesen Einsatzzweck konzipiert und konstruiert und erfüllt daher die notwendigen Bedingungen, um einen langfristigen Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Er ist aus korrosionsbeständigem Stahl (1.4301) gefertigt und verfügt nicht über eine Membran, weshalb weder Druckschwankungen (vgl. Kapitel 5.3.1) noch die wechselnde Medienbeschickung einen negativen Einfluss auf die Festigkeit und damit auf die Funktion des Behälters haben.
 5. Um die gegenläufige Durchströmung der Membranpumpen zu vermeiden, wird, wie in der Industrie üblich, ein Rückschlagventil auf der Druckseite der Pumpen verbaut. Dadurch wird die gegenläufige Durchströmung der Anlage und der Pumpen verhindert und es dient ebenso dazu, die Druckschläge vor den Pumpen zu mindern.
 6. Der Kaltwasserzähler wurde neu positioniert und verfügt über eine Ein- und Auslaufstrecke von jeweils mindestens 300mm.

Zusätzlich werden weitere Modifikationen an der Anlage vorgenommen:

1. Um das rückläufige Einströmen von Luft (von der Turbine aus) in die Anlage zu vermeiden, wird eine Entlüftung mit einem künstlichen Hochpunkt zwischen das Ausgangsventil und den Wasserzähler gesetzt. Damit wird auch der Wasserzähler weitestgehend vor Luftblasen geschützt (vgl. Kapitel 5.2 Punkt 8).
2. Es wird eine Entleerung als Abzweig vom Messstutzen des Manometers eingebracht (vgl. Abbildung 5-24), mit deren Hilfe der Druckspeicher entleert werden kann, ohne dass Wasser durch die Turbine strömt. Gleichzeitig kann über diesen Stutzen das Wasserreservoir mit den Pumpen bis auf einen Restfüllstand entleert werden.
3. Am Druckspeicher sollte ein Sicherheitsventil montiert werden. Obwohl durch die Pumpen eine Notabschaltung und somit ein Schutz vor Überdruck gegeben ist, muss der Behälter gegen Überdruck und damit verbunden gegen Bersten gesichert werden. Ein denkbarer Fall wäre zum Beispiel die Erhitzung des Behälters im Brandfall. Dadurch würde sich zum einen die Druckluft ausdehnen, des Weiteren würde aber vor allem das Wasser anfangen zu sieden und somit zu einem erheblichen Druckanstieg führen. Dafür wären zwar erhebliche Übertemperaturen notwendig

$$T_{\text{Sattdampf}}(6 \text{ bar}) \approx 165^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{Sattdampf}}(10 \text{ bar}) \approx 184^{\circ}\text{C}$$

diese würden im Brandfall aber voraussichtlich nach kurzer Zeit erreicht. Um in diesem Fall ein Bersten des Behälters zu vermeiden, muss ein Sicherheitsventil mit einer Druckeinstellung von

$$p_{SV} = 10 \text{ bar}$$

vorgesehen werden.

Das Sicherheitsventil wird auf einen der beiden Gewindestutzen auf der Oberseite des Behälters montiert. Bei dem ausgewählten Ventil handelt es sich um ein „TÜV-Sicherheitsventil G1/2" (DN8), 10,00bar, Messing“ der Firma Landefeld.

Technische Daten

Werkstoff	Messing
Gewinde	G 1/2"
Ansprechdruck [bar]	10,00
Abblasleistung* [m³/h]	261,0
H [mm]	63
h [mm]	14
SW [mm]	24

Abbildung 5-15: Technische Daten Sicherheitsventil (Art.-Nr. SV 12 8-10 MS)
Quelle: <https://www.landefeld.de/artikel/de/tuev-sicherheitsventil-g-12-dn8-1000-bar-messing/SV%2012%208-10%20MS>

4. Genau wie das Sicherheitsventil wird auch der Druckluftanschluss des Behälters über einen der beiden Gewindestutzen an der Oberseite des Behälters umgesetzt. Dazu wird eine Schnellschlusskupplungsdose in Nennweite 7,2 am Behälter montiert. Das Gegenstück dazu wird an einem Schlauch montiert, an dessen anderen Ende der Druckluftanschluss für das Druckluftnetz des Labors vorgesehen ist. Der vorhandene Druckluftkompressor verfügt über den gleichen Anschluss. Dabei handelt es sich um ein Fabrikat der Firma „Walther Präzision (Curt Walther GmbH & Co. KG)“, genauer um eine Druckluftkupplung der Serie UF mit Vierkant in Nennweite 12mm (Produktbezeichnung: „UF-012“).

Zusätzlich zu den aufgeführten Modifikationen werden diverse neue Komponenten verbaut, die für den Betrieb der Anlage notwendig sind. Dazu zählen die Netzteile zur Stromversorgung der Pumpen, die Messbox (USB-Schnittstelle für Mess- und Steuersignale), ein Widerstand als elektrische Last für den Generator und verschiedene Sensoren mit der dazugehörigen 24V-Gleichspannungsquelle. Zu den Sensoren gehört auch der Wasserzähler, der über seinen Signalausgang als Volumenstrommessung genutzt werden soll.

5.3.2.1 Netzteile zur Stromversorgung der Pumpen

Da die Anlage im Smart Grid zukünftig mit anderen Teilprojekten zusammenarbeiten soll, empfiehlt es sich, die Grundbestandteile der Anlagen soweit möglich aufeinander abzustimmen. Aus diesem Grund werden wie im WEA-Modell (vgl. „Konstruktion eines Funktionsmodells eines Windenergieanlagentriebstranges zur Implementierung in ein Smart Grid“, Rouven Kanitz) Netzteile der Firma Voltcraft verwendet. Da die Pumpen bis zu 144W (12V und 12A) Leistung aufnehmen, mussten Netzteile beschafft werden, die diesen Ansprüchen genügen. Es wurden drei Netzteile vom Typ „DPPS-16-40“ beschafft. Damit steht für jede Pumpe ein separates Netzteil zur Verfügung. Von den Leistungswerten der Netzteile (1-16V; 0-40A) würde ein Netzteil für die Versorgung ausreichen. Das würde aber eine Verschaltung mit zusätzlichen Bauteilen notwendig machen, auf die nach Möglichkeit verzichtet werden soll. Außerdem können die Pumpen durch die einzelnen Netzteile, falls gewünscht, verhältnismäßig einfach unabhängig voneinander geregelt werden.

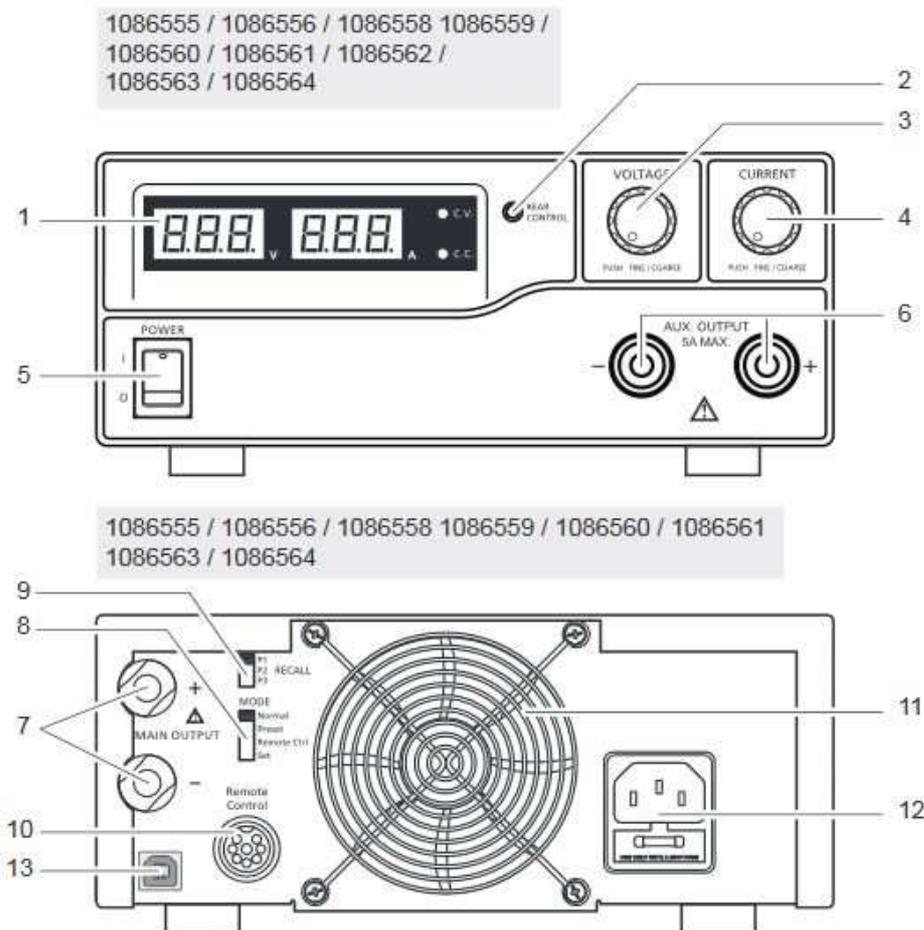


Abbildung 5-16: Beschreibung Netzteil VOLTcraft DPPS-16-40
Quelle: Bedienungsanleitung: Labor-Netzgerät Bedienungsanleitung, Version 01/16 (Anhang 10)

Die Netzteile können über vier verschiedene Eingabequellen (vgl. Abbildung 5-16, 8) gesteuert werden (Anhang 10): Normalbetrieb („Normal“), Speicherplatzbetrieb („Preset“), Fernsteuerbetrieb („Remote Ctrl“), Einstellbetrieb („Set“). In allen Betriebsarten werden die aktuellen Werte für Strom und Spannung über das LED-Messanzeigeelement wiedergegeben. Die Wahl des Betriebsmodus erfolgt über den Wahlschalter „Mode“ (vgl. Abbildung 5-16, 8) an der Rückseite des Netzteils.

1. Im Normalbetrieb wird das Netzteil über die beiden Drehsteller an der Vorderseite eingestellt. Dabei werden Maximalwerte für Strom und Spannung vorgegeben, die an der LED-Anzeige abgelesen werden. Werden die Drehsteller betätigt, wechselt die Anzeige vom aktuellen Wert zum eingestellten Maximalwert. Nach Betätigung der Drehsteller wechselt die Anzeige wieder zurück zu den Momentanwerten.
2. Für den Speicherplatzbetrieb können im Gerät drei Festspannungen eingespeichert werden, die über einen separaten Wahlschalter an der Rückseite ausgewählt werden können. Die Stromstärke kann in diesem Modus nicht eingestellt werden, da die vorderen Drehsteller deaktiviert sind.
3. Der Fernsteuerbetrieb ermöglicht es, die Maximalwerte für Strom und Spannung über eine Steuerspannung vorzugeben. Die Anschlüsse für die Steuerspannung liegen auf der Rückseite. Alternativ zu einer Steuerspannung wäre auch ein einstellbarer Widerstand zur Steuerung möglich. Für diese Anlage soll aber eine Steuerspannung genutzt werden. Es müssen pro Netzteil zwei Eingänge genutzt werden. Je einer für Strom und einer für Spannung, wobei für beide Anschlüsse der gleiche Rückleiter genutzt wird.

4. Der Modus Einstellbetrieb ist in diesem Sinne kein eigenständiger Modus, sondern dient ausschließlich zur Einstellung der Festspannungen für den Speicherplatzbetrieb. Da die Pumpen stromgeführt geregelt werden sollen, kann für alle drei Pumpen die gleiche Spannung und damit auch die gleiche Steuerspannung vorgegeben werden. In diesem Fall beträgt der Wert 12V, was der Betriebsspannung der Pumpen entspricht (vgl. Abbildung 5-2).

Kontakt 1	Interne Steuerspannung + 5 V/DC (<50 mA)	
Kontakt 2	Spannungseinstellung	
Kontakt 3	Stromeinstellung	
Kontakt 4	Bezugsmasse („Ground“)	
Kontakt 5	Ausgang Ein/Aus	
Kontakt 6 – 8	Nicht belegt	

Abbildung 5-17: Voltcraft DPPS-16-40, Kontaktbelegung des Fernsteueranschlusses
Quelle: Bedienungsanleitung: Labor-Netzgerät Bedienungsanleitung, Version 01/16 (Anhang 10)

Für die Fernsteuerung der Netzteile werden die Anschlüsse 2, 3 und 4 der Fernsteuerbuchse benötigt (vgl. Abbildung 5-17, rechts). Die Rückleiter aller drei Netzteile werden dabei zusammen auf einen „Ground“-Anschluss der Messbox gelegt. Die Spannungseinstellung erfolgt, wie oben beschrieben, ebenfalls über einen Ausgang der Messbox. Die Stromeinstellung ist für jedes Netzteil separat.

Als Stromausgang wird der hintere „Main Output“ (vgl. Abbildung 5-16, 7) genutzt. Die vorderen Anschlüsse sind zum einen nur bis zu einer Stromstärke von 5A geeignet und zudem im Fernsteuerbetrieb deaktiviert.

5.3.2.2 Messbox – LabJack U6

Um die Netzteile über einen Computer ansteuern zu können, ist zusätzlich ein „USB-Mess-System“, in dieser Arbeit als „Messbox“ bezeichnet, notwendig. Über diese Messbox können auch die verbauten Messinstrumente mit dem PC verbunden werden. Ebenso wären weitere Steuerausgänge denkbar.

Die Messbox ist im Grunde ein Signalwandler, der digitale und analoge Eingangssignale per USB an einen Computer weitergeben kann und umgekehrt auch USB-Signale eines Computers in digitale oder analoge Ausgangssignale wandelt.

Für diese Anlage wurde aus verschiedenen Gründen das Model „U6“ der Firma „LabJack Corporation“ aus den USA gewählt. Der wichtigste Auswahlkriterium ist die Kompatibilität von Messbox und der unter Windows verwendeten MATLAB-Software. Das nächstwichtigste Kriterium ist die Anzahl der analogen Ausgänge, die zur Steuerung der Netzteile notwendig sind. Die Box selber verfügt nur über zwei Analogausgänge, kann aber durch einen zusätzlichen Chip erweitert werden. Der Chip, bei dem es sich um einen „LJTick-DAC“ handelt, wandelt einen der digitalen Ein-/Ausgangs-Blöcke (vier Anschlussklemmen) zu zwei analogen Ausgängen (DAC – Digital-Analog-Converter). Damit stehen vier Ausgänge für die drei Netzteile zur Verfügung, wobei der vierte Ausgang für das Spannungssignal der Netzteile benötigt wird. Da an allen Netzteilen dauerhaft die gleiche Spannung anliegen kann (vgl. Kapitel 5.3.2.1), ist dafür ein Ausgang ausreichend. Ein weiterer Vorteil des LabJack U6 sind die unkomplizierten Erweiterungsmöglichkeiten. Genau wie der LJTick können weitere Module einfach an den vorhandenen Anschlüssen montiert werden. Dabei bilden vor allem die beiden Schraubanschlüsse auf der Rückseite der Box vielfältige Möglichkeiten. Die beiden 15- und 37-poligen Anschlüsse können mit Zusatzplatinen (z.B. CB37-Terminalboard) erweitert werden. Somit besteht die Möglichkeit, die Anlage für spätere Versuche einfach zu erweitern und Messtechnik und andere elektronische Bauteile zu ergänzen.

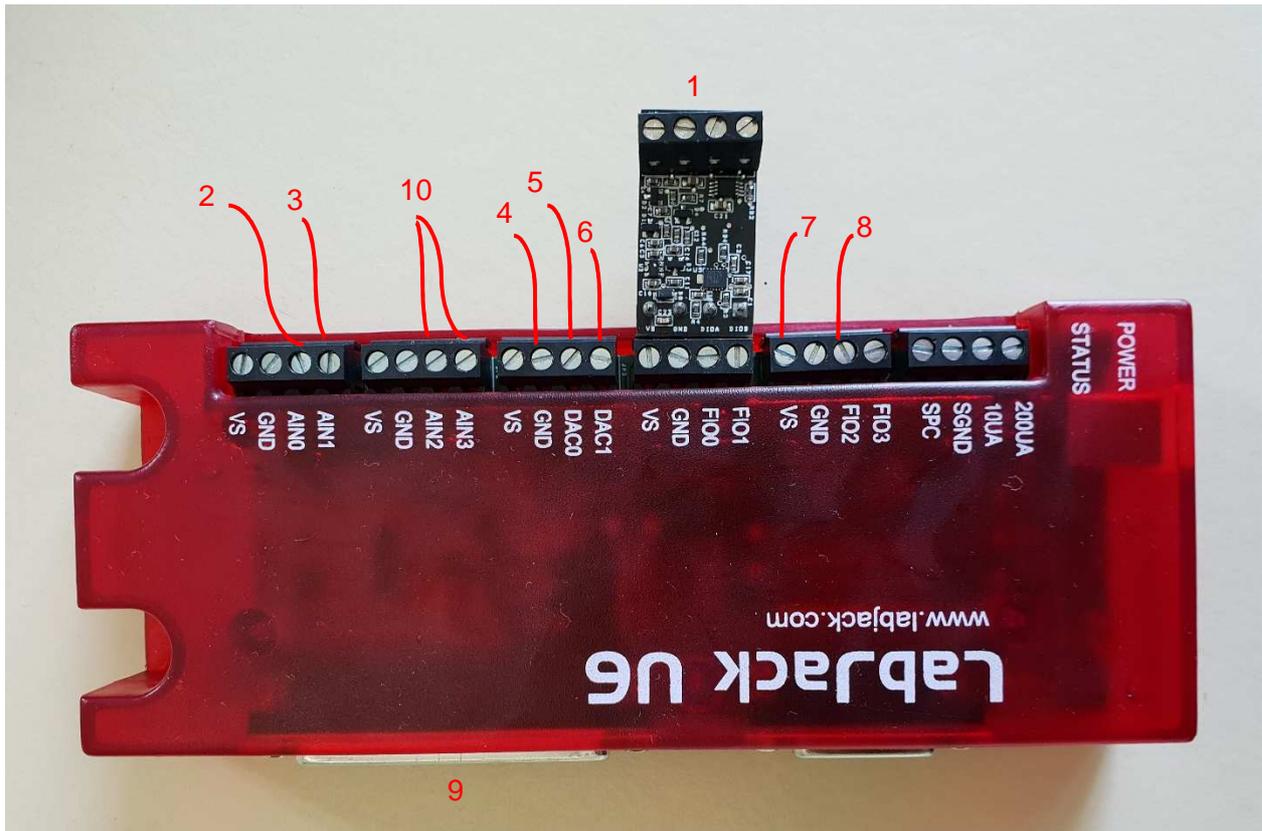


Abbildung 5-18: Messbox LabJack U6 mit LJTick-DAC

Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 5-18 und Abbildung 5-19 ist die Messbox „LabJack U6“ mit der Erweiterung „LJTick-DAC“ abgebildet. Die eingetragenen Nummern stehen dabei für die verwendeten Ein- und Ausgänge.

- 1 FIO0/1: Anschluss für LJTick-DAC-Erweiterung des LabJack U6
- 1.1 DACA: Analogausgang des LJTick-DAC zur Stromsteuerung der 3. Pumpe (rechts)
- 1.2 DACB: Analogausgang des LJTick-DAC zur Spannungssteuerung aller Pumpen
- 2 AIN0: Analogeingang für die Messwerverfassung des Füllstandsensors
- 3 AIN1: Analogeingang für die Messwerverfassung des Stromsensors (Generatorstrom)
- 4 GND: Rückleiter (Ground) für die Steuerspannungen der Pumpenanschlüsse
- 5 DAC0: Analogausgang zur Stromsteuerung der 1. Pumpe (links)
- 6 DAC1: Analogausgang zur Stromsteuerung der 2. Pumpe (mitte)
- 7 VS: Versorgungsspannung (5V) für den Impulssensor des Wasserzählers
- 8 FIO2: Digitaleingang als Zähler für den Anschluss des Impulsausgangs des Wasserzählers
- 9 Anschluss für CB37-Erweiterung des LabJack U6
- 10 AIN2, AIN3 und AIN13: Analogeingang für die Messwerverfassung der Stromsensoren (Pumpenströme)

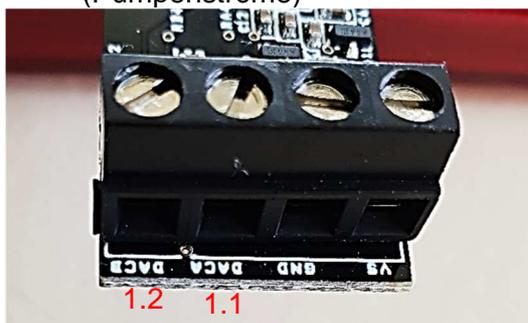


Abbildung 5-19: LJTick-DAC Anschlüsse

Quelle: Eigene Darstellung

Wie genau die einzelnen Eingänge verwendet werden, ist Kapitel 6 zu entnehmen.

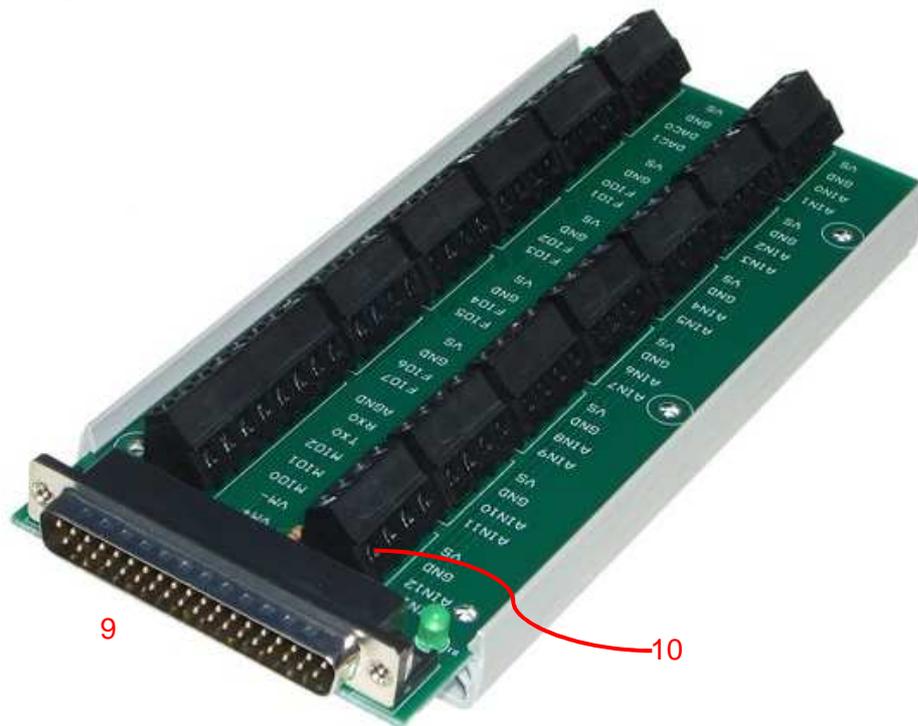


Abbildung 5-20: CB37 Terminalboard für LabJack U6
Quelle: https://labjack.com/sites/default/files/LabJack_CB37_V2.1_0.jpg

5.3.2.3 Elektrischer Widerstand als Last am Generator

Der elektrische Widerstand stellt nur eine Übergangslösung dar, solange das Modell noch nicht im Smart Grid integriert ist. Normalerweise wäre die elektrische Last am Generator das Netz beziehungsweise die am Netz angeschlossenen Verbraucher. Solange dieser Netzanschluss und die damit verbundene elektrische Last nicht gegeben sind, wird ersatzweise ein einstellbarer elektrischer Widerstand verwendet.

Bei dem verbauten Widerstand handelt es sich um ein Potentiometer (umgangssprachlich Schiebewiderstand) aus dem Bestand des Elektrotechniklabors der HAW (vgl. Abbildung 5-21). Das Potentiometer verfügt über einen Durchgangswiderstand von ungefähr $11,2\Omega$ und ist für bis zu 10A (kurzzeitig bis zu 13A) geeignet. Bei einer geschätzten Leistungsabgabe der Turbine von 110W bei 25V (vgl. Tabelle 5-1) würde sich ein maximaler Strom von circa 4,4A ergeben, was deutlich unter der zulässigen Stromstärke des Widerstandes liegt.



Abbildung 5-21: Foto des Schiebewiderstandes mit Typenschild
Quelle: Eigene Darstellung

Für eine maximale Leistungsausbeute des Gleichstromgenerators muss der äußere Widerstand – das Potentiometer – den gleichen elektrischen Widerstand besitzen wie der Generator selbst

(Generatorinnenwiderstand). Der Widerstand des Potentiometers wird dabei über ein Multimeter vermessen und möglichst genau an den Innenwiderstand des Generators angepasst. Beachtet man die Angaben aus Tabelle 5-1 und erweitert die Tabelle mit dem Innenwiderstand und dem Ankerstrom (vgl. Formel (13) und (14)) des Generators, so ergibt sich eine erweiterte Tabelle (vgl. Tabelle 5-5).

$$R_i = \frac{U^2}{P} \quad (13)$$

$$I_A = \frac{P}{U} \quad (14)$$

Tabelle 5-5: Erweiterte Tabelle Leistungsdaten der Turbine

DüsenØ	Fallhöhe	Volumen- strom	Spannung	Leistung	Innerer Widerstand	Ankerstrom
mm	m	l/s	V	W	Ω	A
3,00	100,00	0,31	25,00	110,00	5,68	4,40
3,00	80,00	0,28	22,00	100,00	4,84	4,55
3,00	60,00	0,24	19,00	90,00	4,01	4,74
3,50	40,00	0,27	16,00	70,00	3,66	4,38
4,00	35,00	0,33	15,00	60,00	3,75	4,00
4,00	30,00	0,30	13,00	60,00	2,82	4,62
4,50	25,00	0,35	12,00	50,00	2,88	4,17
5,00	20,00	0,39	11,00	50,00	2,42	4,55
5,50	15,00	0,41	10,00	40,00	2,50	4,00
7,00	10,00	0,54	8,00	30,00	2,13	3,75

Bei einem Blick in die erweiterte Tabelle fällt auf, dass sowohl der innere Widerstand als auch der Ankerstrom nicht konstant über die einzelnen Betriebszustände sind. Der variable Ankerstrom kann an einem nicht konstanten Drehmoment aufgrund einer variablen Last bei der Vermessung liegen. Der Innenwiderstand des Generators sollte jedoch eine konstante Größe sein. Da dies nicht der Fall ist, muss ein geeigneter Betriebspunkt beziehungsweise Betriebsbereich durch Tests am Generator vermessen und evaluiert werden. Da der Betriebsbereich voraussichtlich zwischen 6bar und 10bar liegt, sollte der Innenwiderstand zwischen 4Ω und 6Ω liegen.

5.3.2.4 Spannungsversorgung der Sensoren

Für die Versorgung der Stromsensoren und des Füllstandsensors wird übergangsweise eine Gleichstromquelle aus dem Laborbestand verwendet (vgl. Abbildung 5-22). Diese liefert Gleichstrom mit 24V und maximal 1A. Der Stromsensor benötigt circa 52mA und der Füllstandsensoren 12mA (ohne Füllstandsänderung). Folglich ist die Leistung der Gleichstromquelle mehr als ausreichend.



Abbildung 5-22: Gleichstromquelle für die Versorgung der Sensoren (Beispielbild)
Quelle: Eigene Darstellung

5.3.2.5 Stromsensor

Um die elektrische Leistung der Pumpen und des Generators erfassen zu können, wird der Strom gemessen, der von den Bauteilen aufgenommen beziehungsweise abgegeben wird. Um diesen Messwert in eine Leistung umzurechnen, muss mindestens ein weiterer Wert bekannt sein. Bei den Pumpen ist dies die Spannung. Solange die Netzteile der Pumpen nicht in die Strombegrenzung laufen, ist die Spannungsbegrenzung aktiv. Diese ist durch die Software auf 12V eingestellt.

Für den Generator liefert der Lastwiderstand (vgl. Kapitel 5.3.2.3) den zweiten Wert. Da die gesamte am Generator erzeugte Leistung über den Widerstand abfallen muss, kann anhand der Größe des Widerstandes die Leistung berechnet werden.

Für die Erfassung der Stromstärke wird bei allen Komponenten der gleiche Sensor verwendet. Dabei handelt es sich um einen Gleichstromsensor, der mit Hilfe einer 24V-Versorgungsspannung ein magnetisches Feld erzeugt. Durch die Mitte dieses Feldes (vgl. Abbildung 5-23, links: Loch in der Mitte des Sensors) wird der elektrische Leiter geführt. Je nach anliegender Stromstärke wird das Magnetfeld verändert. Diese Veränderung wird im Sensor in ein 0-10V-Signal umgewandelt. Bei dem Sensor handelt es sich um das Fabrikat „CYCT03-84S3-1.0-U20A“ der Firma „ChenYang Technologies GmbH & Co. KG“ (vgl. Anhang 13: Datenblatt Stromsensor).

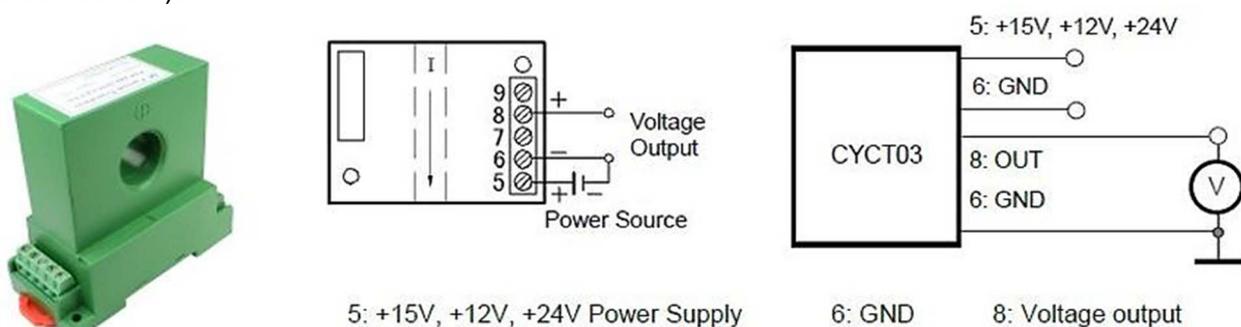


Abbildung 5-23: Stromsensor CYCT03-xnS3 und Schaltplan

Quelle: https://www.sonnecty-shop.com/media/image/b6/c0/d8/CYCT03-xnS3_Freigestellt_2_200x200.jpg

5.3.2.6 Füllstandmessung

Zur messtechnischen Erfassung der Füllstandhöhe im Druckspeicherbehälter kommt eine Bypass-Füllstandmessung der Firma „Bühler Technologies“ zum Einsatz. Dabei handelt es sich um das Modell „NS 25/25[...]“ (vgl. Anhang 12: Datenblatt Füllstandsensor). Sie wird an den beiden Flanschanschlüssen des Behälters montiert und misst die Füllstandhöhe des Wassers im Speicher. Dazu wird ein magnetischer Schwimmer genutzt, der in einem Edelstahlrohr zwischen den beiden Flanschanschlüssen auf dem Wasser treibt. Zur elektronischen Erfassung des Füllstandes ist eine Schiene mit Reed-Kontakten (eine Art Magnetschalter) parallel zum Rohr befestigt. Über einen Sensor wird erfasst, welche der Reed-Schalter ausgelöst wurden und dementsprechend wird ein Signal im 4-20mA-Format ausgegeben. Vor der Messbox wird dieses Signal über einen 500Ω-Widerstand (vgl. Kapitel 6.2.4.2) geleitet und der Spannungsabfall an der Messbox erfasst, sodass die Messbox ein Signal im 2-10V-Format (hier 2-10V) erfassen kann. Zusätzlich zu der Schiene mit den Reed-Kontakten verfügt die Sensoreinheit auch über eine analoge Anzeige und über eine weitere Schiene. Die Anzeige besteht aus einem Plexiglasrohr, das parallel zu dem Edelstahlrohr liegt. In diesem Plexiglasrohr befindet sich ein zweiter magnetischer Schwimmer, der durch die magnetische Anziehung immer auf derselben Höhe steht, wie der Schwimmer im Edelstahlrohr. Die Schiene bietet die Möglichkeit, einzelne Niveauschalter zu montieren, die bei Unter- oder Überschreitung des gewählten Niveaus ein Signal ausgeben. Solche Signalgeber könnten als Grenzschalter für einen minimalen und einen maximalen Füllstand genutzt werden (vgl. Kapitel 9). Sie können auch nachträglich montiert werden.

5.3.2.7 Volumenstrommessung (Wasserzähler)

Als Volumenstromsensor wird der in Kapitel 5.1.1.4 erwähnte Wasserzähler verwendet. Dieser verfügt über einen Impulsausgang in Form eines Reed-Schalters. Dieser Schalter öffnet alle 0,25l und gibt damit den Impuls aus, der wiederum von der Messbox erfasst und von der Software gezählt wird. Über die Anzahl der Impulse kann anschließend näherungsweise ein Volumenstrom berechnet werden (vgl. Kapitel 6.2.4.6).

5.4 Aufbau der neuen Anlage

In Abbildung 5-24 ist die umgebaute Anlage mit allen vorhandenen und teilweise bereits mit geplanten hydraulischen und elektrischen Komponenten und Verbindungen in Form eines R&I-Schemas dargestellt. Die Hauptkomponenten der Anlage sind beschriftet. Die schwarzen Verbindungen stellen die hydraulische Verschaltung der Anlage dar. Die roten (230V AC) und gelben (24V DC) stellen die elektrischen Verbindungen dar, wobei die Verbindung von der Turbine beziehungsweise vom Generator der Turbine bis zum elektrischen Widerstand ebenfalls rot dargestellt ist, obwohl diese Verbindung nicht auf 230V-Wechselstrombasis arbeitet. Die grünen Linien bilden die Steuer- und Messleitungen ab. Dabei sind die Verbindung zwischen der Messbox und dem Auslassventil und der Druckmessung (PI) gestrichelt dargestellt. Diese Verbindungen sind noch nicht vorhanden und können mit den derzeit verbauten Komponenten auch nicht hergestellt werden. Diese Verbindungen sollten im weiteren Verlauf des Smart Grid-Projektes an dieser Anlage nachgerüstet werden, da sie eine erhebliche Verbesserung der Anlagensteuerung und der Messwertauswertung ermöglichen würden (vgl. Kapitel 5.4, Absatz 1 und 3).

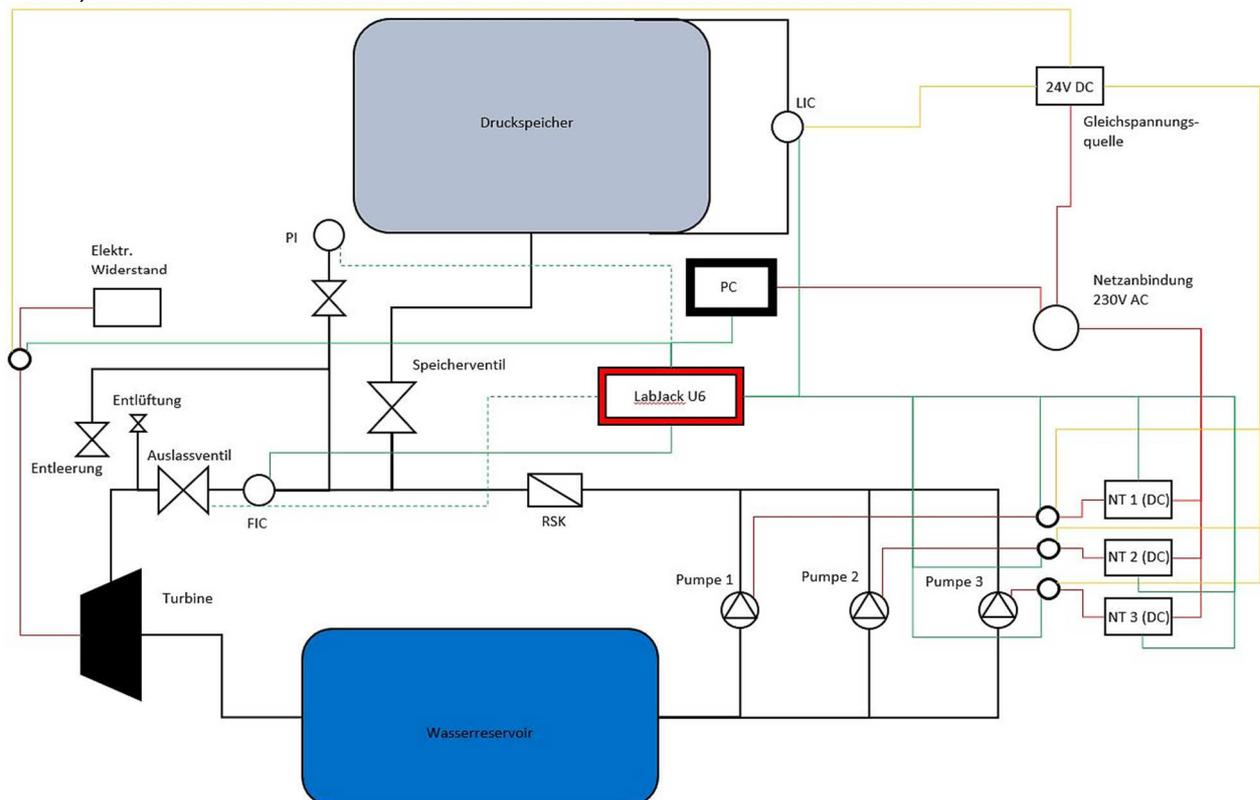


Abbildung 5-24: R&I der umgebauten Anlage (Originalgröße in Anhang 11)
Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 5-25: Foto der Anlage im Endzustand
Quelle: Eigene Darstellung

5.5 Optimierungspotenzial des Neuaufbaus

Der Grundaufbau der Anlage wurde wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt überarbeitet, hat aber noch kein Optimum erreicht (sofern man aus technischer Sicht davon sprechen kann). Sollten zukünftig finanzielle, technische und zeitliche Ressourcen zur Verfügung stehen würden sich unter anderem folgende Optimierungen anbieten (vgl. auch Kapitel 9).

1. Die vorhandene analoge Druckmessung könnte durch einen elektrischen Sensor ergänzt oder ersetzt werden. Dieser würde die Aufnahme und damit auch die Verarbeitung von Druckmesswerten in der Software ermöglichen. Eine Notwendigkeit dazu besteht im aktuellen Aufbau der Anlage nicht, könnte sich aber durch Umbauten ergeben und würde zudem eine Auswertung der Druck-Volumenstrom-Zusammenhänge erleichtern.
2. Der Arbeitsbereich der Anlage liegt zwischen 5bar und 10bar, was einem Fallhöhenunterschied von ungefähr 50m entspricht. Eine solche Schwankungsbreite ist für Pumpspeicher eher ungewöhnlich, vor allem in Verbindung mit der verhältnismäßig geringen Maximalfallhöhe (10bar \approx 100m). Um diesen Effekt zu reduzieren, wäre es denkbar, einen zusätzlichen Druckluftspeicher an der Anlage zu installieren. Dieser könnte den Anlagendruck über einen längeren Zeitraum konstant halten. Für die Umsetzung gäbe es grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten, die alle zwei grundlegende Gemeinsamkeiten haben:
 - (1) Es müsste zusätzlicher Aufwand betrieben werden, um diesen Druckluftspeicher anzuschließen und mit Ventilen zu verbinden, damit er die gewünschte Funktionsweise erfüllt.
 - (2) Es wäre eine externe Druckluftspeisung notwendig, die den Druckluftspeicher immer wieder füllt. Damit würde eine externe Energiezufuhr geschaffen, die es bei echten Pumpspeichern so nicht gibt. Das Modell müsste also von der herkömmlichen Betriebsweise entfernt werden, um es näher an ein herkömmliches Betriebsverhalten zu bringen. Es stellt sich also vor der Umsetzung die Frage, was für die Anlage wünschenswerter wäre.
3. Der neue Druckspeicherbehälter hat in Bezug auf die ursprünglichen Membrangefäße einen wesentlichen Nachteil: Wasser- und Druckluftphase sind nicht mehr getrennt. Dadurch kann es im Turbinenbetrieb zur vollständigen Entleerung des Behälters kommen, wenn das Auslassventil (vgl. Abbildung 5-24) nicht rechtzeitig geschlossen wird. Um diesen Fall ausschließen zu können, wäre es sinnvoll, einen Mindestfüllstand des Behälters festzulegen (vgl. Kapitel 5.3.1.1, Punkt 2). Dieser Füllstand müsste entweder in der Steuerungssoftware hinterlegt werden oder direkt über einen separaten Sensor an der Füllstandmessung erfasst werden. Zusätzlich müsste das Auslassventil (vgl. Abbildung 5-24) der Anlage durch ein angetriebenes Ventil ersetzt oder mit einem Antrieb ergänzt werden. Sobald der Mindestfüllstand erreicht wird, muss ein Schaltsignal an diesen Antrieb ausgegeben werden, damit das Ventil schließt und so eine vollständige Entleerung des Behälters verhindert werden kann. Aufgrund der geringeren Fehleranfälligkeit ist es empfehlenswert, einen separaten Sensor zu verwenden und die Steuerungssoftware so weit wie möglich zu umgehen. Damit könnten wahrscheinlich auch deutlich kürzere Reaktionszeiten für die Schließung erreicht werden.
Zusätzlich ist zu erwähnen, dass der Ventilantrieb in jedem Fall stromlos geschlossen sein sollte (Stichwort „Fail Safe“), um im Fehlerfall den Anlagenbetrieb automatisch stoppen zu können.

6 Erstellung der Steuersoftware in MATLAB

Die Steuersoftware für die Anlage wird als Applikation (kurz App) mit dem „MATLAB AppDesigner“ programmiert. Dafür gibt es zwei wesentliche Gründe:

1. Die Steuersoftware für das WEA-Modell wurde bereits als App programmiert (vgl. „Konstruktion eines Funktionsmodells eines Windenergieanlagentriebstranges zur Implementierung in ein Smart Grid“, Rouven Kanitz). Die Software der beiden Anlagen sollte möglichst ähnlich gestaltet werden, um sie im späteren Verlauf des „Smart Grid-Projektes“ besser kombinieren zu können.
2. Als App kann die Software sehr einfach auf jedem Computer mit kompatibler MATLAB-Software installiert werden. Außerdem kann der Code während der Bedienung nicht bearbeitet und somit auch nicht beschädigt werden.

Ein weiterer Vorteil des AppDesigners ist der grundlegende Aufbau der Software. Im Gegensatz zu anderen Programmieroberflächen ermöglicht der AppDesigner den Aufbau der Software ausgehend von der Oberfläche und nicht vom Basiscode aus. Diese Möglichkeit entsteht, da beim AppDesigner die Benutzeroberfläche den möglichen und notwendigen Code bereits vorgibt. Dadurch kann die Software aufgebaut werden, indem zu Beginn die gewünschten Steuer- und Ausgabeelemente für die Anlage platziert werden. Diese lassen sich auch im Verlauf der Programmierung einfach anpassen und ergänzen. Ist die Oberfläche fertiggestellt, können „Callbacks“, „Functions“, „Properties“ und „App Input Arguments“ erzeugt werden. Die Callbacks (Funktionen, die durch das Betätigen von Elementen ausgelöst werden) beziehen sich dabei direkt auf einzelne Elemente der Oberfläche und der AppDesigner gibt auch eindeutig vor, welche Arten von Callbacks für die einzelnen Elemente zur Verfügung stehen. Alles, was die App ausführt, muss in diese Callbacks oder extra eingeführten Functions programmiert werden, wobei die Callbacks dabei immer einen Auslöser für die Funktion bieten, während die Functions entweder dauerhaft aktiv sind oder einen eigens angelegten Auslöser (z.B. Funktionsaufruf) benötigen. Ein Beispiel dafür wäre die „StartUpFcn“ (gesprochen: „Start up Function“), die beim Start der App einmalig ausgeführt wird.

Der Aufbau der Benutzeroberfläche richtet sich also grundlegend nach der neu aufgebauten Anlage (vgl. Kapitel 5.3). Die Oberfläche sollte folgende Elemente zur Steuerung enthalten:

- Schalter für den Betriebszustand der Anlage (Pumpbetrieb/ Turbinenbetrieb)
- Schalter für den Betrieb der Anlage über die App hinweg (Fernsteuerung)
- Schalter für die einzelnen Pumpen
- Schalter für Start und Stop
- Überprüfungsmöglichkeit für den Zustand des Ausgangsventils

Und folgende Elemente zur optischen Darstellung der in der Anlage gemessenen Werte:

- Graph mit aktuellen Leistungswerten der Pumpen/ Turbine
- Skala für den Füllstand des Druckspeicherbehälters in Litern und Millimetern (Füllhöhe)
- Skala für den aktuellen Volumenstrom (Berechnung über Volumen des Zählers)

Des Weiteren werden folgende Elemente vorgesehen, auch wenn sie im derzeitigen Stand der Anlage teilweise ohne Funktion sind:

- Aktuelle Druckanzeige
- Aktuelle Stromaufnahme der Pumpen/ Pumpenauslastung
- Abbildung des aktuellen R&I-Schemas der Anlage (vereinfacht)
- Anpassungsmöglichkeiten für den Leistungsgraph
- Ausgabe für (Warn-)Hinweise

6.1 Benutzeroberfläche der App

Aus den oben genannten Bedingungen zum Inhalt der Oberfläche wird im MATLAB AppDesigner eine Benutzeroberfläche gestaltet. Dabei hinterlegt der AppDesigner direkt den notwendigen Code für die Initialisierung der einzelnen Elemente im Code der App. Dieser Teil des Codes kann nicht modifiziert werden. Aus der Aufgabenstellung dieser Arbeit geht hervor, dass die Oberfläche benutzerfreundlich gestaltet sein soll. Aus diesem Grund wird nicht nur auf die Funktionalität, sondern auch auf die Verständlichkeit der Oberfläche geachtet.

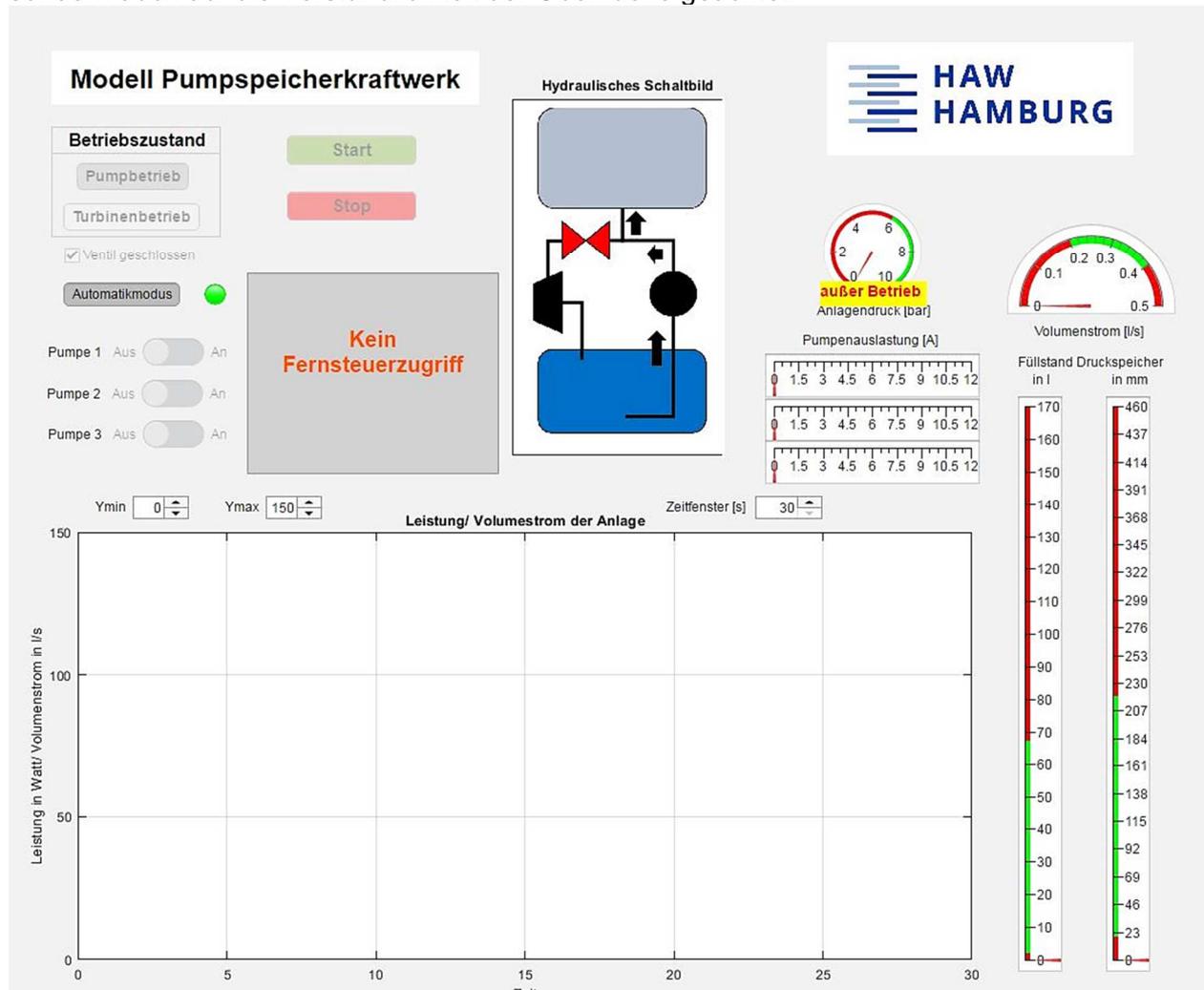


Abbildung 6-1: Benutzeroberfläche der App (Automatikmodus)
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Die App startet grundsätzlich im Automatikmodus. Das bedeutet, dass die Anlagensteuerung für den Zugriff durch Dritte (z.B. ein Smart Grid) freigeschaltet ist. Die Parameter müssen über ein separates Programm oder eine externe Datei vorgegeben werden. Dabei sind alle Eingabemöglichkeiten (Knöpfe und Schalter) bis auf die Anpassungen des Graphen „Leistung/ Volumenstrom der Anlage“ gesperrt. Damit soll verhindert werden, dass es innerhalb der App zu widersprüchlichen Eingaben kommt, die den Betrieb stören könnten. Außerdem soll während des Fernzugriffs ein Überschreiben der vorgegebenen Parameter verhindert werden. Über die Anzeigen und Graphen können auch im Automatikmodus die Messwerte und damit das Verhalten der Anlage beobachtet werden.

Durch einen Klick auf den Knopf „Automatikmodus“ kann dieser deaktiviert werden. Um ein ungewolltes Beenden des Automatikmodus zu verhindern, ist dieser Button an eine Abfrage gekoppelt (vgl. Abbildung 6-2).

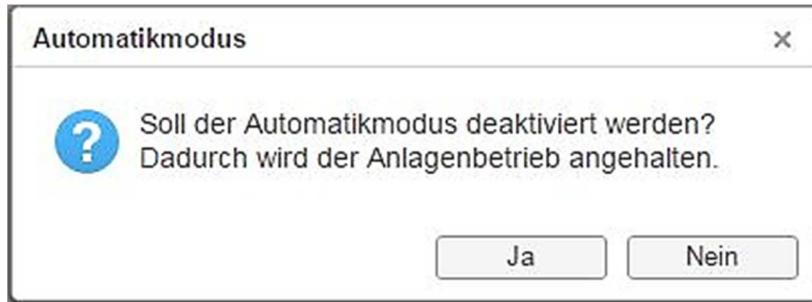


Abbildung 6-2: Abfrage zum Beenden des Automatikmodus
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Erst wenn diese Abfrage bestätigt wird, wird der Automatikmodus deaktiviert und der manuelle Zugriff auf die Anlage durch die App freigeschaltet. Zusätzlich werden durch die Deaktivierung des Automatikmodus die Fernzugriffsmöglichkeiten eingeschränkt. Damit soll in auch während des manuellen Betriebes ein innerer Widerspruch der beiden Steuerzugriffe vermieden werden. Des Weiteren wird beim Wechsel aus oder in den Automatikmodus immer der Anlagenbetrieb angehalten. Auch hier könnte es zu erheblichen Fehlern kommen, wenn im Fernzugriff andere Betriebsweisen angegeben werden als im manuellen Betrieb.

6.1.1 Beschreibung der Oberfläche

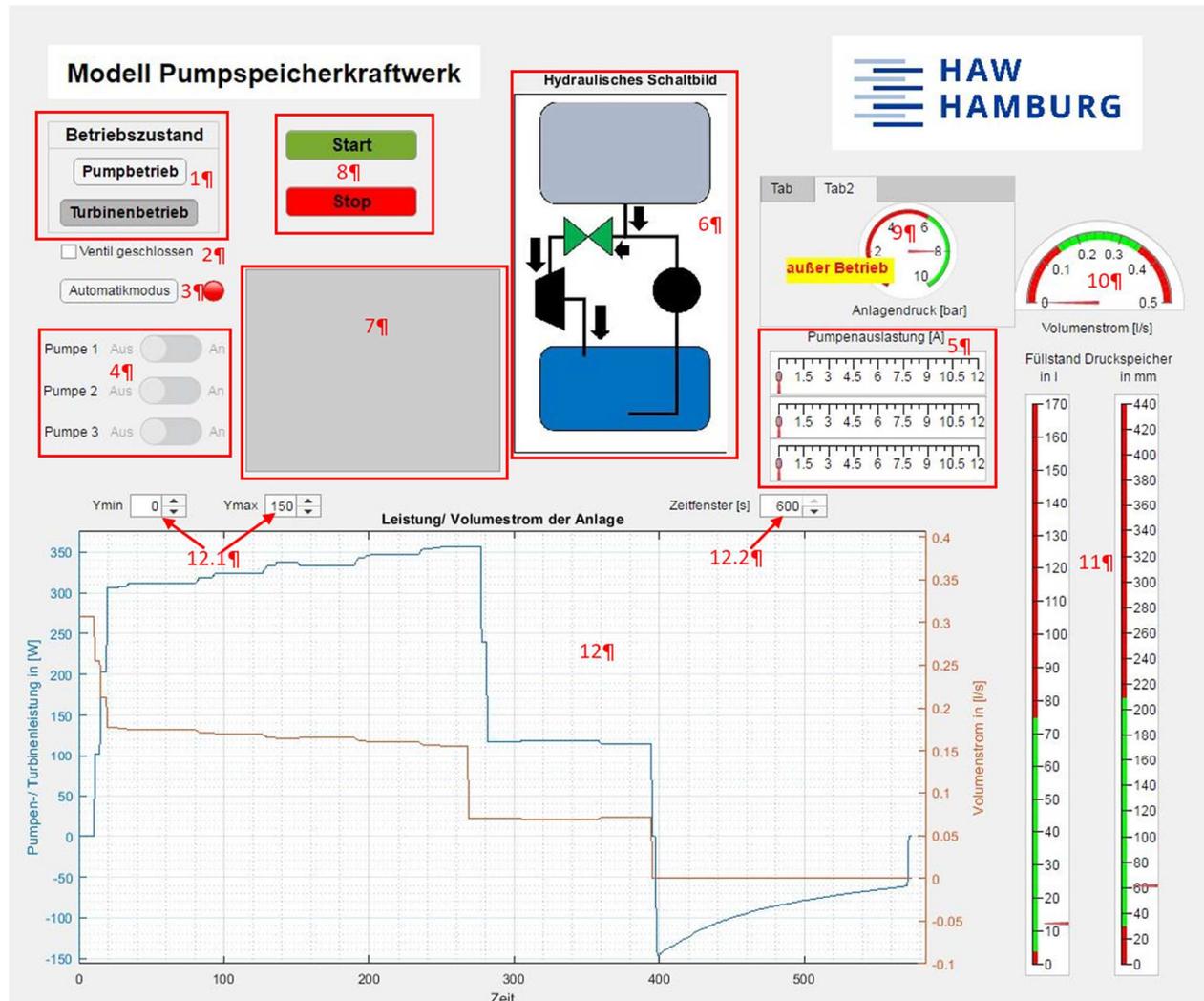


Abbildung 6-3: Benutzeroberfläche der App (manueller Modus)
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Im Folgenden werden die in Abbildung 6-3 gezeigten Elemente der Oberfläche genauer beschrieben. Dazu werden die Benennung und Funktion innerhalb der App und die Bezeichnung des MATLAB-Elementes genutzt, wobei jeweils der Begriff in Anführungszeichen die Funktion in der App und der Begriff in Klammern das MATLAB-Element bezeichnen.

(1): „Betriebszustand“-Wahlschalter (Toggle Button Group)

Die Wahl des Betriebszustandes ist die zentrale Eingabe für die App, da vom gewählten Betriebszustand alle weiteren Parameter beeinflusst werden. Die Auswahl beeinflusst zum Beispiel, welches hydraulische Schaltbild angezeigt wird (vgl. Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5). Je nach Betriebszustand werden die Schalter für die Pumpen (4) gesperrt oder freigegeben. Im laufenden Betrieb der Anlage kann der Betriebszustand nicht geändert werden. Die Schalter werden nach Betätigung des Start-Knopfes (8) gesperrt.

(2): „Ventil geschlossen“-Auswahl (Check Box)

Die Auswahl über den Zustand des Ausgangsventils (offen/geschlossen) ist ein weiterer wichtiger Parameter für die Funktion der App. Die dort getroffene Auswahl ist direkt mit der Auswahl des Betriebszustandes verknüpft. Im Pumpbetrieb muss das Ventil geschlossen sein, im Turbinenbetrieb dagegen geöffnet. Passen die Auswahl an der Check Box und der gewählte Betriebszustand nicht zusammen, lässt sich die Anlage nicht starten (vgl. (8)) und es erscheint die Warnmeldung „WARNUNG! Ventilstellung passt nicht zum gewählten Betriebszustand. Ventil und CheckBox überprüfen!“ im Hinweifenster (7).

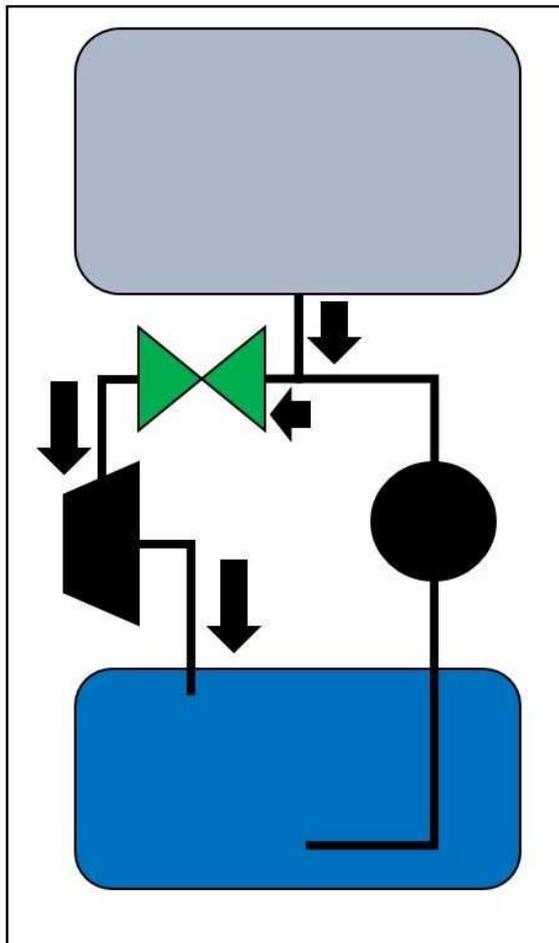


Abbildung 6-4: Vereinfachtes R&I offen
Quelle: Eigene Darstellung

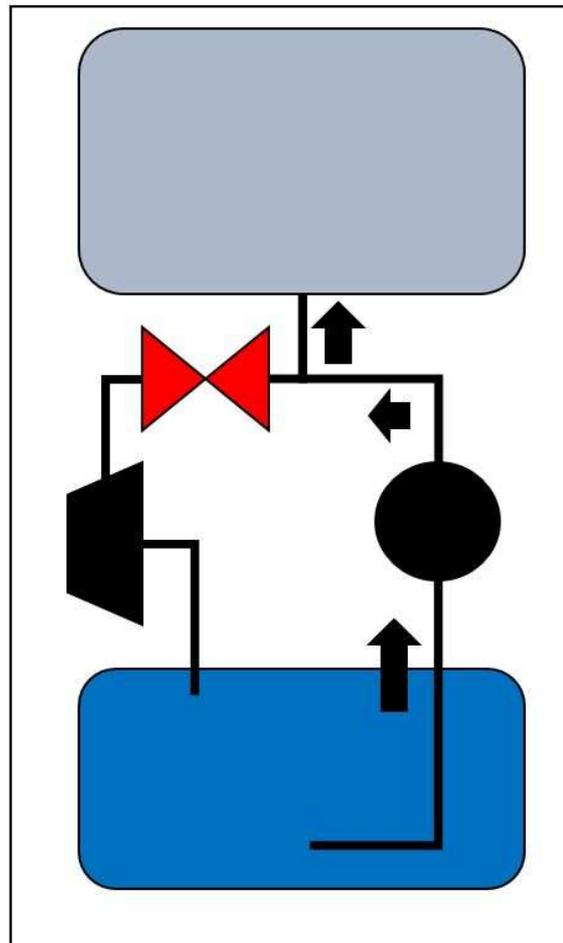


Abbildung 6-5: Vereinfachtes R&I geschlossen
Quelle: Eigene Darstellung

(3): „Automatikmodus“-Button + Lampe (State Button + Lamp)

Der Automatikmodus dient im Wesentlichen zur Steuerung der Zugriffsart auf die Anlage. Daneben gibt es den manuellen Zugriff über die App. Für die Integration in ein Smart Grid soll ein Fernsteuerzugriff (innerhalb des Automatikmodus) implementiert werden. Dieser erhält seine Befehle über eine separate Funktion oder eine übergebene Datei/Matrix. Damit die beiden Zugriffsarten sich nicht gegenseitig beeinflussen, wird über den Knopf „Automatikmodus“ eine Trennung der Zugriffe umgesetzt. Genauer gesagt, wird das „overwrite“-Recht zugewiesen. Die Lampe dient dabei, zusätzlich zur Optik des Schalters und der Freigabe der anderen Elemente der Oberfläche, der visuellen Anzeige der derzeitigen Zugriffsart.

(4): „Pumpen“-On-Off-Schalter (Switch)

Die Pumpen der Anlage sollen nicht geregelt, sondern lediglich an- und ausgeschaltet werden. Somit ist bei der Leistungsaufnahme eine dreistufige „Regelung“ der Anlage möglich. Wobei die Stromaufnahme der Pumpen je nach Anlagendruck variiert (die Stromaufnahme steigt mit zunehmendem Druck, vgl. Abbildung 5-2).

(5): „Pumpenauslastung“-Anzeige (Linear Gauge)

Um die aktuelle Auslastung der einzelnen Pumpen zu visualisieren, wird die Stromaufnahme der Pumpen direkt angezeigt (in der Software ist die Schnittstelle vorgesehen, die Sensoren sind aber noch nicht vorhanden).

(6): „Hydraulisches Schaltbild“-Anzeige (Axes)

Im MATLAB-AppDesigner lassen sich Bilder am besten in Graphen (engl. Axes) darstellen. Das hydraulische Schaltbild dient dabei nur zur Kontrolle der Ventilstellung und zum Abgleich mit der Anlage.

(7): „Warnhinweis“-Anzeige (Text Area)

In diesem Feld werden alle Warnhinweise angezeigt, die durch mögliche Fehler in der Bedienung der App auftreten können. Die Hinweise dienen dabei in erster Linie dazu, den Anwender auf den Fehler aufmerksam zu machen und einen Hinweis auf mögliche Lösungen zu geben.

(8): „Start-Stop“-Knopf (Button)

Diese Knöpfe dienen dazu, die Anlage zu starten und wieder anzuhalten. Programmtechnisch sind sie der Auslöser für den während des Betriebs ausgeführten Code.

Darüber hinaus wird durch das Betätigen des Stop-Button nicht nur die Anlage angehalten. Gleichzeitig wird ein Hinweis-Fenster geöffnet, das den Anwender darauf hinweist, dass die gerade aufgenommenen Messwerte in einer Datei im MATLAB-Workspace abgelegt wurden (vgl. Abbildung 6-6).

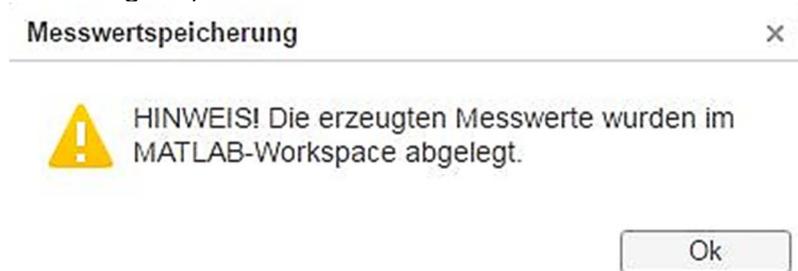


Abbildung 6-6: Hinweis zur Messwertspeicherung
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

(9): „Anlagendruck“-Anzeige (Gauge)

Zurzeit ist kein digitaler Sensor zur Messung des in der Anlage herrschenden Druckes installiert. Da ein solcher Sensor nachträglich integriert werden sollte (vgl. Kapitel 5.5 und Kapitel 9.1), wurde die Anzeige in der Oberfläche bereits vorgesehen.

(10): „Volumenstrom“-Anzeige (Semicircular Gauge)

Der verbaute Wasserzähler ist kein Volumenstromsensor, wie man ihn normalerweise in einer solchen Anlage verbauen würde. Er zählt lediglich das Gesamtvolumen des hindurchgeströmten Wassers, ohne dabei eine zeitliche Verteilung zu berücksichtigen. Über eine interne Zeitmessung können die gemessenen Werte trotzdem zu einem Volumenstrom umgerechnet werden, der dann in dieser Anzeige und im Hauptgraphen der App (12) angezeigt wird.

Der Sensor kann ausschließlich den Volumenstrom im Turbinenbetrieb erfassen, da er im Pumpbetrieb durch das geschlossene Auslassventil nicht durchströmt wird.

(11): „Füllstand Druckspeicher“-Anzeige (Linear Gauge)

Der Füllstandsensoren der Anlage misst die Füllhöhe des Druckspeicherbehälters. Da es sich um einen liegenden Behälter handelt, kann die Füllhöhe über eine Kreisbogenberechnung in ein Füllvolumen umgerechnet werden. Für die Steuerung der Anlage ist das Volumen an sich nicht notwendig, kann aber durch den linearen Zusammenhang mit der Speicherkapazität einen Rückschluss auf das Verhalten der Anlage ermöglichen.

(12): „Leistung/Volumenstrom“-Anzeige (Axes)

Diese Anzeige bildet das Zentrum der App. Sie gibt ausführliche Informationen über das Verhalten der Anlage. Es werden zwei beziehungsweise vier Messwerte wiedergegeben. Der erste Wert ist der Volumenstrom, dessen aktueller Wert auch schon über eine Anzeige angegeben wird (10). Der zweite Wert ist der aus der Leistungsaufnahme der Pumpen berechnete Pumpenvolumenstrom. Beide Werte werden im zeitlichen Verlauf dargestellt. Da immer nur einer der Volumenströme von Bedeutung ist, werden beide Werte in einem Graphen angezeigt (roter Graph).

Die anderen beiden Messwerte werden ebenfalls in einem Graphen gemeinsam dargestellt. Dieser gibt die Leistungsaufnahme der Pumpen und die Leistungsabgabe der Turbine über die Zeit wieder (blauer Graph).

Dadurch, dass Volumenstrom und Turbinenleistung in einem Graphen vereint sind, lassen sich Zusammenhänge besser erkennen.

(12.1): „Y-Achsen“-Einstellung (Spinner)

Die maximalen und minimalen Werte für die Y-Achsen können vom Anwender innerhalb vorgegebener Grenzen frei eingestellt werden. Damit wird sichergestellt, dass einerseits größere Zusammenhänge sichtbar gemacht werden, andererseits auch das Zoomen auf einzelne Teilstücke des Graphen möglich ist.

(12.2): „Zeitfenster“-Einstellung (Spinner)

Genau wie die Y-Achse kann auch die X-Achse, in diesem Fall die Zeitachse, frei eingestellt werden. Dabei wird immer ein minimaler Ausschnitt von 30 Sekunden angezeigt. Der Maximalwert der X-Achse liegt stets fünf Sekunden vor dem aktuellen Zeitpunkt, wodurch eine bessere Übersichtlichkeit über den aktuellen Verlauf der Messwerte gewährleistet wird.

Die Skalen einiger Anzeigen (vgl. (9), (10), (11)) sind farblich hinterlegt. Der grüne Teil markiert dabei den im Betrieb zu erwartenden Bereich, während Messwerte im roten Teil der Skala die Ausnahme sein sollten. Wenn die Werte länger im roten Bereich liegen, arbeitet die Anlage nicht so wie erwartet und sollte überprüft werden.

6.2 MATLAB-Code (AppDesigner Code View)

Wie bereits ausgeführt (vgl. Kapitel 6), hinterlegt MATLAB automatisch den grundlegenden Code zur Initialisierung der einzelnen Oberflächenelemente. Dieser Code legt das Erscheinungsbild der App fest, besitzt darüber hinaus aber keine weitere Funktion. Die Funktionalität der App muss also durch zusätzliche Funktionen und Callbacks generiert werden.

Dabei wird zuerst die Funktionalität der Oberfläche programmiert, indem den notwendigen Elementen die passenden Callbacks zugewiesen werden. Diese Callback-Funktionen werden anschließend mit dem auszuführenden Code hinterlegt, der zum Beispiel beim Drücken eines Knopfes aufgerufen werden soll. Über diese Callbacks können weitere Funktionen in der App oder auch andere Callbacks aufgerufen werden.

6.2.1 Funktionsprogrammierung der Benutzeroberfläche

Der Code, der in den Callbacks hinterlegt wird, wird beim Auslösen der Elemente ausgeführt. Um die Funktionalität der Oberfläche herzustellen, sind vor allem Abfragen zum Zustand bestimmter Oberflächenelemente notwendig. Ist zum Beispiel die Check Box „Ventil geschlossen“ betätigt? Oder welcher der Betriebszustände ist aktuell ausgewählt? Da es sich dabei in der Regel um unkomplizierte Abfragen mit dem „Switch/Case“-Befehl handelt, bietet es sich an, diese bei Bedarf direkt im Code der App nachzulesen. Die meisten Funktionen sind über die Kommentarfunktion von MATLAB („%“) kurz beschrieben (vgl. Anhang 6: Quellcode der App).

Die wesentlichen Callbacks liefern der Startbutton, der Betriebszustand und der Automatikmodus. Wie bereits in Kapitel 6.1.1 teilweise ausgeführt, dient der Automatikmodus vor allem zur Trennung zwischen der manuellen Steuerung der Anlage und dem Fernsteuerzugriff. Dafür sind weniger Abfragen als bei den anderen Callbacks notwendig, da diese Funktion eine Art „Overwrite“ darstellt. Sobald der Modus gewechselt wird, muss der aktuelle Betrieb gestoppt werden. Und je nachdem, ob der manuelle Zugriff aktiviert oder deaktiviert wurde, werden die Oberflächenelemente freigegeben oder gesperrt.

Der „Betriebszustand“ dient vor allem der Abfrage der richtigen Sensoren und derzeit dem sicheren Betrieb der Anlage. Solange kein automatisches Ventil verbaut ist, bildet der „Betriebszustand“ zusammen mit der „Ventil geschlossen“-CheckBox die einzige Überprüfungsmöglichkeit für den korrekten Betrieb. Zusätzlich wird die Pumpensteuerung über den „Betriebszustand“ aktiviert und deaktiviert. Das ist notwendig, da im Turbinenbetrieb keine der Pumpen aktiviert werden sollte. Schäden an der Anlage sind dadurch zwar nicht zu erwarten, aber die aufgenommenen Messwerte würden deutlich verfälscht. Außerdem kann in diesem Fall nicht abgeschätzt werden, wie sich die Anlage verhalten würde.

Der Startbutton-Callback bildet die wichtigste Funktion der App. Er startet den Betrieb im manuellen Modus und beinhaltet fast alle notwendigen Abfragen bezüglich des sicheren und korrekten Betriebs der Anlage. Weiterhin ruft er alle notwendigen Funktionen zur Erfassung von Messwerten und zur Ansteuerung von Geräten (z.B. Pumpen) auf. Eine Besonderheit der Pumpensteuerung ist, dass diese auch im laufenden Betrieb genutzt werden kann und sich die Pumpen ein- und ausschalten lassen. Ein Stopp der Anlage zur Anpassung der Pumpenleistung wäre unnötig, zumal sich die Messwerte viel besser analysieren lassen, wenn die Messwertkurven keine Unterbrechungen aufweisen.

Eine weitere wichtige Funktion ist die Speicherung der Messwerte. Diese Funktion kann nicht direkt in der Oberfläche ausgelöst werden, sondern arbeitet automatisch beim Betrieb der Anlage und speichert die aufgenommenen Messwerte in einer Variablen im „MATLAB-Workspace“. Zusammen mit der Plot-Funktion zur Darstellung der Messwerte im Hauptgraph der App stellt die Messwertspeicherung die einzige Funktion dar, die nicht direkt von der Messbox abhängig ist.

Alle anderen Funktionen sind auf die Ein- und Ausgaben aus der Messbox angewiesen, was diese zum zentralen Element für die Funktionalität der App macht.

6.2.2 Messboxunabhängige Funktionen

6.2.2.1 Plot-Funktion

Die Plot-Funktion ist keine eigenständige Funktion, sondern eine Erweiterung der Messwertaufnahme (vgl. Kapitel 6.2.4). Um die Übersichtlichkeit des Codes zu erhöhen, wird diese Funktion alleinstehend geschrieben. Eine direkte Integration in die Messwernerfassung wäre zwar denkbar, würde die umfangreiche Messwernerfassung noch unübersichtlicher machen. Zusätzlich bietet diese Vorgehensweise die Möglichkeit, die Funktion später aus der App zu lösen und zum Beispiel ein zusätzliches Tool zu entwickeln, um die gespeicherten Messwerte (vgl. Kapitel 6.2.2.2) im Nachhinein anzeigen und auswerten zu können. Dabei ist darauf zu achten, dass der Plot (vgl. Abbildung 6-3, 12) nur aus der App möglich ist, da der Graph (bzw. die Axes) nur aus der App aufgerufen werden kann. Die Funktion darf also nur kopiert werden.

Für den Plot selbst wird die Funktion „plot“ benutzt. Sie wird am Ende jedes Durchlaufs der while-Schleife für die Messwernerfassung aufgerufen (vgl. Kapitel 6.2.4). Somit wird der Graph regelmäßig aktualisiert. Als Datenübergabe dient die gleiche Matrix, die auch für die Messwertspeicherung genutzt wird. Für den Plot wird die erste, zweite und sechste Spalte verwendet. Die erste Spalte dient als Zeitstempel respektive als X-Wert. Die zweite und die sechste Spalte beinhalten Volumenstrom und Pumpen-/ Generatorleistung. Diese dienen als Y-Werte. Für eine bessere Ablesbarkeit des Graphen werden durch „yyaxis“ zwei unterschiedliche Y-Achsen verwendet. Beide Y-Achsen werden automatisch mit dem Befehl „ylim([...],‘auto‘)“ skaliert (vgl. Abbildung 6-7).

Die X-Achse wird je nach eingestelltem Zeitfenster (vgl. Abbildung 6-3, 12.2) angepasst, indem die Länge der Messwert-Matrix ausgelesen wird.

```
yyaxis(app.UIAxes, 'left')  
plot(app.UIAxes, app.Messwerte(:,1), app.Messwerte(:,5)); % Leistung  
ylim(app.UIAxes, 'auto');
```

Abbildung 6-7: MATLAB-Code: Plot-Funktion, automatische Skalierung

Quelle: Eigene Darstellung

6.2.2.2 Messwertspeicherung

Die Speicherung der aufgenommenen Messwerte ist weder eine eigene MATLAB-Funktion noch ist der verwendete Code umfangreich oder kompliziert. Dennoch soll die Funktion an dieser Stelle erwähnt werden, da die aufgenommenen Werte bei einer späteren Integration der App in ein Smart Grid von großer Wichtigkeit für die Funktionalität innerhalb des Smart Grids sein könnten. Aktuell werden die Messwerte nach Unterbrechung der while-Schleife (vgl. Kapitel 6.2.4) durch Betätigung des Stop-Buttons mit einem Zeit-Stempel abgelegt (vgl. Abbildung 6-8). Die Variable „Messwerte[...]“ ist dabei eine zweidimensionale Matrix mit beliebig vielen Zeilen und einer vorgegebenen Anzahl an Spalten. Jede Spalte steht dabei für einen bestimmten Messwert, wobei die erste Spalte den internen Zeitstempel der App beinhaltet. Diese Matrix wird immer weiter beschrieben, solange die App geöffnet bleibt. So sind alle Daten in der letzten Matrix zusammengefasst, es können aber auch kürzere Zeiträume betrachtet werden.

```
% Speichern der Messwerte in Datei in Workspace  
SafeVar = strcat('Messwerte', datestr(now, 'mmmmddyyyyHHMMSS'));  
assignin('base', SafeVar, app.Messwerte);
```

Abbildung 6-8: MATLAB-Code: Messwertspeicherung

Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Für die spätere Integration in ein Smart Grid könnten sowohl die Daten wie auch der damit verbundene Zeitstempel zur Auswertung und Weiterverarbeitung der Daten genutzt werden. Die Speicherung sollte dann aber konstant erfolgen und als Speicheradresse wäre ein anderer Ort als der MATLAB-Workspace sinnvoll. Auch der Zeitstempel sollte in diesem Fall unabhängig vom Betrieb des Pumpspeichers gewählt werden.

Für die aktuell vorliegende Verwendung der Speicherung werden die jeweiligen Ergebnisse immer mit einem Datumsstempel abgelegt. Daher ist darauf zu achten, dass nicht mehr benötigte

Ergebnisse regelmäßig aus dem Workspace entfernt werden. Gleichzeitig sollten Ergebnisse zur späteren Verwendung an einen alternativen Speicherplatz kopiert werden.

6.2.3 Code-Vorlagen von LabJack (Skripte und Funktionen)

Anders als bei einigen anderen Herstellern von Messinstrumenten gibt es für die Geräte der Firma „LabJack Corporation“ keine direkte Möglichkeit zur Integration in MATLAB (z.B. über die Apps „Instrument Control“ oder „Analog Input Recorder“). Stattdessen gibt es von LabJack programmierte Code-Beispiele, die diverse Funktionen erfüllen. Diese Form der Kommunikation mit den LabJack-Geräten wird „UD Communication“ genannt.

Für den „LabJack U6“ gibt es fünf Beispiel-Skripte:

- „U6_efunctions“: Dieses Skript zeigt mehrere Beispiele zur Verwendung der sogenannten „e-functions“ in MATLAB. Diese Funktionen bieten eine Alternative zu der in den anderen Skripten verwendeten Programmieranweisung für den Zugriff auf die Messbox.
- „U6_ei1050“: Der „EI 1050“ ist ein Sensor der Firma LabJack zur Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit. In diesem Skript wird die Kommunikation mit diesem Sensor beispielhaft dargestellt. Da ein solcher Sensor in der Anlage nicht verbaut wird, findet dieses Skript keine Anwendung.
- „U6_simple“: Bei diesem Skript handelt es sich um eine einfache Grundlage zur Kommunikation zwischen MATLAB und dem LabJack U6. Dabei werden verschiedene Befehle genutzt, wie das Vorgeben der Ausgangsspannung für einen Analogausgang oder das Auslesen eines Analogeinganges.
- „U6_simplestream“: Bei diesem Skript geht um das „Streamen“, also Empfangen und nahezu gleichzeitige Wiedergeben von Messdaten. Auch dieses Skript findet keine Anwendung.
- „U6_timer_counter“: Da die aussagekräftige Benennung von Programmen hilfreich für eine übersichtliche Programmierung ist, lässt sich auch aus der letzten Skript-Bezeichnung – wie auch bei den vorgenannten Skripten – einfach erkennen, wofür der Code gedacht ist. Es geht um die Verwendung des im LabJack U6 verbauten Counters. Da es keine separate Hardwareschnittstelle für den Counter gibt, werden einige Anschlüsse des Gerätes doppelt verwendet. In diesem Fall sind es die digitalen Ein-/Ausgänge (FIO0 – FIO3, auch Digital I/O) und die Versorgungsspannungen (VS).

Wie erwähnt, unterscheiden sich die Skripte vor allem durch zwei unterschiedliche Arten der Kommunikation mit der Messbox. Während im Skript „U6_efunctions“ über die namensgebenden e-Funktionen mit dem U6 kommuniziert wird, verwenden die anderen Skripte eigens hinterlegte Objekte und handles, die als strings an den LabJack übergeben werden. Bei einem Blick in die Historie der Beispielskripte (verwendete Skripte vom 25.04.2018, ältere Version vom 24.06.2014) wird ersichtlich, dass die Verwendung der e-Funktionen einem Update der Software gleichkommt (nicht enthalten in der Version von 2014). Zusätzlich kann der „README“-Datei der aktuellen Skripte entnommen werden, dass die Skripte (vor allem „U6_simplestream“) teilweise angepasst werden müssten, da die Objekte und dazugehörigen handles in neueren MATLAB-Versionen (ab 2018) nicht mehr funktionieren. Grundsätzlich sind alle Skripte auf Grundlage von „C#“ programmiert und nachträglich an MATLAB angepasst.

Ein wesentlicher Bestandteil aller Skripte ist der Verbindungsaufbau zwischen dem Gerät und MATLAB. Dieser erfolgt stets über dieselben Befehle. Im Grunde erzeugen sie ein eigenes Objekt für die Messbox in MATLAB, dessen Eigenschaften mit den folgenden Befehlen angepasst werden.

```
% Make the UD .NET assembly visible in MATLAB.
ljasmb = NET.addAssembly('LJUDDotNet');
ljjudObj = LabJack.LabJackUD.LJUD;

try
    % Read and display the UD version.
    disp(['UD Driver Version = ' num2str(ljudObj.GetDriverVersion())])

    % Open the first found LabJack U6.
    [ljerror, ljhandle] = ljjudObj.OpenLabJackS('LJ_dtU6', 'LJ_ctUSB', '0',
true, 0);
```

Abbildung 6-9: Beispiel-Code zur Erstellung des LabJack-Objektes in MATLAB
Quelle: MATLAB - LabJackUD .NET examples for Windows 04/25/2018 (MATLAB)

Innerhalb von MATLAB wird für die Kommunikation ein Objekt erzeugt: „ljjudObj“ (kurz für LabJack-UD-Objekt). Bei den handles muss unterschieden werden zwischen den „.NET-handles“, die auch innerhalb von MATLAB verwendet werden können (z.B. „addAssembly“, „AddRequestS“ oder „GoOne“) und den handles, die als strings an die Messbox übergeben werden und erst dort ausgeführt werden können (z.B. „LJ_ioGET_X“ und „LJ_ioPUT_X“, wobei X variiert und unterschiedliche Befehle beinhaltet). Die in MATLAB verwendeten handles müssen dabei in der neueren Version zur Anpassung (s.o.) häufig am Ende mit einem oder zwei „S“ ergänzt werden (vgl. AddRequestS). Die anderen handles können häufig durch die neueren e-Funktionen ersetzt werden, wobei auch diese häufig mit „SS“ enden (vgl. Abbildung 6-10).

Neben den herunterladbaren MATLAB-Skripten, die als Vorlage zur Kommunikation mit dem LabJack U6 dienen, gibt es online in den Datenblättern der Erweiterungen weitere Code-Beispiele, um diese Erweiterungen ansprechen zu können. Da zur Erweiterung des U6 ein LJTick-DAC eingesetzt wird, muss dieser über solche Befehle angesprochen werden. Dabei wird auf die oben genannten „e-functions“ zurückgegriffen. Diese müssen durch handles ergänzt werden, die intern im U6 weiterverarbeitet werden (vgl. Abbildung 6-10: LJ_ioTDAC_COMMUNICATION).

```
ljjudObj.ePutSS(ljhandle, 'LJ_ioTDAC_COMMUNICATION',
'LJ_chTDAC_UPDATE_DACA', U_P_I, 0);
```

Abbildung 6-10: Beispiel-Code zur Kommunikation mit dem LJTick-DAC
Quelle: <https://labjack.com/support/datasheets/accessories/ljtick-dac>

6.2.4 Integration der Messbox in die App(-Oberfläche)

Die Erfassung der Messwerte (vgl. Kapitel 6.2.4.2 bis 6.2.4.5) geschieht für die vereinfachte Aktualisierung der Oberflächenelemente in einer gemeinsamen while-Schleife mit einem festgesetzten Zeitintervall T.

```
% Aktualisierung der digitalen Anzeigen der App
app.FllstandDruckspeicherGauge.Value = hF;
app.FllstandDruckspeicherGauge_2.Value = VF;
app.VolumenstromlsGauge.Value = VS;
app.Gauge.Value = IP1;
app.Gauge_3.Value = IP2;
app.Gauge_4.Value = IP3;
app.AnlagendruckbarGauge.Value = p;
```

Abbildung 6-11: App-Code: Aktualisierung der Anzeigen der Benutzeroberfläche
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Innerhalb dieser while-Schleife werden auch die in der Oberfläche integrierten Anzeigen aktualisiert, da diese direkt mit den aufgenommenen Messwerten verknüpft werden können. Dazu werden lediglich die Werte (Value) der Oberflächenelemente im Code aktualisiert (vgl. Abbildung 6-11).

Die Steuerung der Pumpen erfolgt durch Ausgabe von Steuerspannungen über die Messbox.

6.2.4.1 Pumpensteuerung

Da es innerhalb der App zu Konflikten bei der Kommunikation mit dem LabJack, genauer mit dem LJTick-DAC kam, wurde die Ansteuerung der Pumpen in eine externe Funktion ausgelagert. Diese ist an das Skript „u6_simple.m“ angelehnt, spricht aber nur die benötigten Analogausgänge an und ist daher deutlich kürzer. Auch die unter Kapitel 6.2.3 erwähnten Code-Vorlagen für die Kommunikation mit dem LJTick-DAC werden verwendet.

Für die Steuerung der Pumpen werden je nach Auswahl in der Oberfläche die zu betreibenden Pumpen übergeben (vgl. Abbildung 6-12). Die Variable „p1“ steht dabei für die erste Pumpe, „p2“ für die zweite und „p3“ für die dritte. Die Variable „SS“ steht für den Status der Anlage (SS:=StartStop). Die Variable ist 0, wenn der Stop-Button gedrückt wurde und 1, wenn der Start-Button gedrückt wurde. Im App-Code ist diese Variable direkt bei jedem Aufruf der Funktion hinterlegt und wird nicht an die Callbacks geknüpft.

```

Funktion: Pumpensteuerung

function Pumpensteuerung(p1,p2,p3,SS)
[...]
switch p1
case 'An'
    ljudObj.AddRequestS(ljhandle, 'LJ_ioPUT_DAC', 0, U_P_I, 0, 0);
case 'Aus'
    ljudObj.AddRequestS(ljhandle, 'LJ_ioPUT_DAC', 0, 0, 0, 0);
end
[...]
```

Aufruf der Funktion aus der App

```

Pumpensteuerung(app.Pumpe1Switch.Value, app.Pumpe2Switch.Value,
app.Pumpe3Switch.Value, 0);
```

Abbildung 6-12: MATLAB-Code: Pumpensteuerung
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Innerhalb der Funktion wird die Ansteuerung der Pumpen durch mehrere „switch – case“-Befehle umgesetzt. Dabei wird auch die Steuerspannung für die Ausgangsspannung der Netzteile auf 0 gesetzt, wenn der Stop-Button betätigt wurde. Das wäre theoretisch nicht notwendig, solange die Steuerspannung für den Strom bei 0V liegt, stellt aber sicher, dass die Netzteile keinen Strom liefern.

6.2.4.2 Füllstandmessung

Die Füllstandmessung erfolgt über den Analog-Eingang (Input) AIN0, indem ein Spannungssignal im Bereich von -10V bis +10V erfasst wird. Der Kontakt zwischen der Messbox und der App erfolgt dabei anhand der e-Funktionen (vgl. Abbildung 6-13).

Die Umrechnung des Spannungssignals in einen Füllstand erfolgt über einen Umrechnungsfaktor (vgl. Kapitel 6.2.4.6).

Damit wird zunächst die Füllstandhöhe gemessen. Um das Füllvolumen des Behälters zu erhalten, muss dieser Wert wiederum umgerechnet werden (vgl. Kapitel 6.2.4.6). Beide Werte werden anschließend direkt innerhalb der while-Schleife an die Anzeigen der Oberfläche weitergegeben (vgl. Abbildung 6-13), sodass diese weitestgehend aktuell sind. Dabei ist hF die Füllstandhöhe und VF das Füllvolumen.

Da der Füllstandsensord der Firma „Bühler Technologies“ kein Spannungssignal, sondern ein in der Industrie übliches „4-20mA“-Signal ausgibt, muss dieses zunächst über eine Schaltung in ein Spannungssignal umgewandelt werden. Diese Umwandlung erfolgt, indem ein entsprechender Widerstand in den Leiter eingesetzt wird. Die über diesen definierten Widerstand abfallende Spannung kann gemessen und über das Ohm'sche Gesetz zurückgerechnet werden. Um ein Signal von 20mA (Maximum) in 10V (Maximum) zu wandeln wird ein Widerstand von

$$R = \frac{U}{I} = \frac{10V}{20mA} = 500 \Omega \text{ (468}\Omega \text{ verbaut)}$$

benötigt. Dieser Widerstand wird parallel zum Analogeingang der Messbox geschaltet.

```
try
    [ljerror, ljhandle] = ljudObj.OpenLabJackS('LJ_dtU6', 'LJ_ctUSB', '0',
true, 0);
    % Take a single-ended measurement from AIN0, +/-10 V range.
    channelP = 0;
    channelN = 199;
    voltage = 0.0;
    LJ_rgBIP10V = ljudObj.StringToConstant('LJ_rgBIP10V');
    range = LJ_rgBIP10V;
    resolution = 8;
    settling = 0;
    binary = 0;
    [ljerror, voltagehF] = ljudObj.eAIN(ljhandle, channelP, channelN, voltage,
range, resolution, settling, binary);
catch e
    showErrorMessage(e)
end
%% Berechnung des Behältervolumens -> Messeingang ist AIN0
%% Berechnung erfolgt anhand der Füllstandhöhe
Rmess = 468; % [Ohm] Widerstand zur Wandlung des mA-Signals in V-Signal
xmess = 16/520; % Verhältnis von mA Signalausngag zu mm Füllstandhöhe
hF0 = ((4+xmess*36.5)/1000)*468; % Spannung bei 0mm Füllstand im Behälter
if voltagehF > hF0 % Umgerechnete Spannung
    hF = (69.444444*voltagehF)-36.5; %Füllstandshöhe in mm
[...]
VF = (VZ+2*VK)/10^6; % Füllstandsvolumen des Behälsters in l
else
    hF = 0;
    VF = 0;
end
```

Abbildung 6-13: MATLAB-Code: Messwerterfassung Füllstand
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Anhand der unter Kapitel 6.2.4.6 berechneten Spannungen für den Mindestfüllstand wird zusätzlich eine Anzeige im Hinweisfeld generiert, die auf die Schließung des Auslassventils aufmerksam macht (vgl. Kapitel 6.1.1, 7). Ab 50mm Füllstandhöhe erscheint der erste Hinweis „Bereit machen, um das Ventil zu schließen!“. Bei 30mm wechselt die Anzeige dann zu „Ventil schließen!“, da der festgelegte Mindestfüllstand für den Behälter bei 30mm liegt.

```
hFmin = 30;  
hFGrenze = 50;  
l = size(app.Messwerte,1);  
if app.Messwerte(1,3) <= hFmin || voltagehF < 2,958  
    app.TextArea.Value = {char(13);char(13);'Ventil schließen!'};  
else  
    if app.Messwerte(1,3) <= hFGrenze  
        app.TextArea.Value = {char(13);char(13);'Bereit machen, um';'das  
Ventil zu schließen!'};  
    end  
end
```

Abbildung 6-14: MATLAB-Code: Mindestfüllstand
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Die Hinweistexte sind dabei nur so lange von Bedeutung, bis ein automatisches Ventil eingesetzt wird. Nach diesem Austausch könnten sie gegen die Ausgabe eines Schaltsignals für das Automatikventil ersetzt werden.

6.2.4.3 Leistungsmessung der Pumpen

Die von den Pumpen aufgenommene elektrische Leistung, die unter Vernachlässigung der geringen Leitungsverluste der abgegebenen Leistung der Netzteile entspricht, wird anhand einer Strommessung berechnet. Da die Versorgungsspannung der Pumpen laut Datenblatt (vgl. Abbildung 5-2) konstant bei 12V liegt, kann anhand der gemessenen Stromstärke die Leistung berechnet werden. Die Pumpen werden von Gleichstrommotoren angetrieben, weshalb keine Phasenverschiebung oder Schaltungsanordnung berücksichtigt werden muss. Die Leistung ergibt sich zu:

$$P_{pump} = I_{pump} * 12V$$

Die Stromstärke wird dabei mit einem Sensor der Firma „Chen Yang Technologies GmbH & Co. KG“ gemessen. Der Sensor arbeitet nach dem Prinzip der magnetischen Modulation. Das bedeutet, er misst den Strom nicht direkt, sondern anhand der Änderung des magnetischen Feldes um den elektrischen Leiter. Nach dem gleichen Prinzip arbeiten auch Stromzangenmessgeräte. Dabei muss der elektrische Leiter nicht unterbrochen werden, sondern wird vom Sensor umschlossen, der dann das entstehende Magnetfeld misst. Bei Gleichstromsystemen wie diesem benötigen diese Sensoren in der Regel eine externe Stromquelle. In dieser Anlage wird eine 24V-Gleichstromquelle verwendet (vgl. Kapitel 5.3.2.4). Als Ausgangssignal generiert der Sensor ein 0-10V-Signal, das direkt an die Analogeingänge der Messbox angeschlossen werden kann. Da der Sensor einen Messbereich von 20mA bis 20A aufweist und das Ausgangssignal proportional zur gemessenen Stromstärke ist, kann der Messbereich des Sensors nicht vollständig genutzt werden. An der Messbox kommen also lediglich 0 bis 6V an. Um innerhalb der App die Stromstärke zu berechnen, muss die Eingangsspannung der Analogeingänge also mit dem Proportionalitätsfaktor des Sensors multipliziert werden. Bei einem Sensor mit maximal 20A und einem Signalausgang von maximal 10V ergibt dieser sich zu

$$\frac{10V}{20A} = 0,5 \frac{V}{A}$$

Der Code, der zur Erfassung der Messdaten genutzt wird, ähnelt dem, der für die Füllstandmessung verwendet wird (vgl. Abbildung 6-13 und Abbildung 6-15). Der einzige Unterschied ist, dass hier gleich drei Werte erfasst werden. Aus diesem Grund wurde auf die Variable „channelP“ verzichtet und stattdessen die Adresse des Channels direkt in den Objektbefehl eingetragen.

Allerdings stehen für die Strommessung der Pumpen nur noch zwei Analogeingänge an der Messbox zur Verfügung. Die ersten beiden werden für die Füllstandmessung und den

Generatorstrom (bzw. die daraus berechnete Generatorleistung) verwendet. Um die Anzahl der Analogeingänge nachträglich zu erhöhen, kann eine zusätzliche Platine an der Rückseite des LabJack U6 angeschlossen werden (vgl. Kapitel 5.3.2.2, Abbildung 5-18 und Abbildung 5-20 (9)). Dieses Terminalboard verfügt nicht nur über zusätzliche Analogeingänge, sondern auch über Digital-I/O's und weitere Analogausgänge.

```
channelN = 199;
voltage = 0.0;
LJ_rgBIP10V = ljudObj.StringToConstant('LJ_rgBIP10V');
range = LJ_rgBIP10V;
resolution = 8;
settling = 0;
binary = 0;
[ljerror, voltageP2] = ljudObj.eAIN(ljhandle, 2, channelN, voltage, range,
resolution, settling, binary);
[ljerror, voltageP3] = ljudObj.eAIN(ljhandle, 3, channelN, voltage, range,
resolution, settling, binary);
Dritte Pumpe über CB37-Terminalboard
```

Abbildung 6-15: MATLAB-Code Messwerterfassung Pumpenleistung

Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

6.2.4.4 Leistungsmessung des Generators

Die Leistungsmessung des Generators erfolgt, abgesehen von einer Ausnahme, analog zur Leistungsmessung der Pumpen. Dabei wird der gleiche Sensor zur Erfassung der abgegebenen Stromstärke verwendet.

Die Ausnahme betrifft die Berechnung der Generatorleistung. Diese erfolgt aufgrund fehlender Spannungsmesswerte gezwungenermaßen auf einem anderen Weg. Da mit dem Sensor nur der Strom gemessen werden kann, wird die Generatorleistung über den Lastwiderstand berechnet. Dieser ist bekannt, sodass zusammen mit der Strommessung eine Leistung berechnet werden kann.

$$P = U * I = I^2 * R = I_{Anker}^2 * R_{Last}$$

6.2.4.5 Volumenstrommessung

Bei dem hier „Volumenstromsensor“ genannten Bauteil handelt es sich um einen handelsüblichen Wasserzähler, wie er in der Wasserversorgung zum Einsatz kommt. Zusätzlich verfügt dieser Sensor über einen Impulsausgang, der jeweils nach 0,25l einen Impuls ausgibt (vgl. Kapitel 5.3.2.7). Für den Signaleingang wird einer der Digital-I/Os als Zähler konfiguriert. Diese Konfiguration erfolgt ebenfalls anhand des Beispielskriptes „e_functions.m“ (vgl. Abbildung 6-16 und Kapitel 6.2.3). Da die Digital-I/Os FIO0 und FIO1 durch den LJTick-DAC belegt sind, können diese nicht für die notwendige „timer/counter“-Konfiguration verwendet werden. Dafür werden die entsprechenden Digital-I/Os durch einen Pin-Offset übersprungen.

```
aEnableCounters(4) = 1;
aReadCounters(4) = 1;
aResetCounters(4) = 1;
ljudObj.eTCValues(ljhandle, aReadTimers, aUpdateResetTimers,
aReadCounters, aResetCounters, aTimerValues, aCounterValues, 0, 0);
AnzVI = aCounterValues(4);
```

Abbildung 6-16: MATLAB-Code: Messwerterfassung Volumenstrom

Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Um aus dem Impulseingang einen Volumenstrom zu berechnen, muss die Anzahl der Impulse über einen festgelegten Zeitraum gezählt und mit dem Impulsfaktor des Wasserzählers (0,25l/Impuls) multipliziert werden. Wird das Ergebnis durch das festgelegte Zeitintervall geteilt (vgl. Kapitel 6.2.4.6), ergibt sich annähernd der mittlere Volumenstrom für dieses Zeitintervall.

Dabei gilt: Je größer das Intervall gewählt wird, desto genauer lässt sich der mittlere Volumenstrom berechnen. Allerdings bedeutet ein großes Intervall auch eine größere Abweichung zwischen dem aktuellen und dem berechneten Volumenstrom. Als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aktualität des berechneten Wertes wird ein Zeitintervall von 5s festgelegt.

Zur Ermittlung des Mittelwertes wird in jedem Durchlauf der Messwert-Schleife die Anzahl der eingegangenen Impulse in eine Matrix geschrieben. Anschließend wird rückwirkend die Anzahl der gemessenen Impulse im Zeitintervall IF gezählt. Aus dieser Anzahl kann dann ein Volumenstrom berechnet werden (vgl. Abbildung 6-17).

```

VS_Matrix(app.n,1) = app.t;
VS_Matrix(app.n,2) = AnzVI;
IF = 5; % Faktor für Rückschrittweite
trueck = app.t-IF; % Rückschritt für das auszählen der Impulse
if trueck < 0
    AnzI = sum(VS_Matrix(:,2));
    VS = AnzI*0,25;
else
    AnzI = sum(VS_Matrix(trueck:app.t,2)); % Anzahl der Impulse im festgelegten
Bereich
    VS= AnzI*0,25/IF; % Umrechnung von Impulszahl in Volumenstrom
end
    
```

Abbildung 6-17: MATLAB-Code: Berechnung Volumenstrom der Turbine
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Analog zur Leistungsmessung von Pumpe und Turbine wird je nach Betriebszustand unterschieden, welcher Messwert relevant ist und wiedergegeben wird. Da es aber nur einen Sensor für die Erfassung des Volumenstroms gibt und dieser nur die Strömung durch die Turbine messen kann, muss der Pumpenvolumenstrom anders berechnet werden.

Der Volumenstrom der Pumpen wird anhand der Stromaufnahme berechnet. Dazu wird die aus dem Datenblatt der Pumpe entnommene Kennlinie verwendet (vgl. Kapitel 6.2.4.6). Dieser Wert kann aktuell zwar nicht verifiziert werden, bildet aber die einzige Möglichkeit, den Volumenstrom der Pumpen darzustellen. Um die suboptimale Verschaltung der Pumpen zu berücksichtigen, werden die einzelnen Werte gewichtet. Die gewählten Faktoren sind reine Schätzwerte und können ebenfalls nicht überprüft werden. Sie variieren, je nachdem welche Pumpen betrieben werden, zwischen 0,3 und 0,6.

6.2.4.6 Berechnungen innerhalb des Codes

Wie in den vorangegangenen Kapiteln festgestellt, gibt es einige Werte innerhalb der App, die nicht direkt aus den Einstellparametern oder den Messwerten hervorgehen. Diese Werte müssen in MATLAB separat berechnet werden. Dabei geht es um:

- Volumenberechnung des Druckspeicherbehälters mittels der Kreissegment-/Kreissegmentberechnung

$$V_{DB} = A_{Kreissegment} * L_{DB}$$

$$L_{DB} = 900 \text{ mm} = 0,9 \text{ m}$$

$$A_{Kreissegment} = r^2 * \arcsin\left(\frac{s}{2 * r}\right) - \frac{s * (r - h)}{2} \quad (15)$$

mit

$$s = 2 * \sqrt{2 * r * h - h^2}$$

Bei dieser Betrachtung wird das Volumen der Klöpperböden vernachlässigt. Da das Volumen des Klöpperbodens mit 12,1 l verhältnismäßig gering und der Volumenanstieg

zusätzlich mit einer dreidimensionalen Wölbung gekoppelt ist, soll der Beitrag des Klörperbodens in dieser Arbeit quadratisch durch

$$V_{Kl\ddot{o}pper,N\ddot{a}herung} = h^2 * (h_1 + h_2)$$

vereinfacht angenähert werden. Mit

$$h_1 + h_2 = 106 \text{ mm (vgl. Kapitel 5.3.1.4)}$$

Dabei wird eine rechteckige Grundfläche mit einem linear ansteigenden Volumen vorausgesetzt. Ist der Klörperboden halb gefüllt, entspricht die Füllhöhe h genau dem Radius r und es ergibt sich ein Volumen von

$$V_{Kl\ddot{o}pper,N\ddot{a}herung}(h = r) = \frac{(223,5^2 * 106) \text{ mm}^3}{10^6 \frac{\text{mm}^3}{\text{l}}} = 5,29 \text{ l}$$

Bei einem Gesamtvolumen von 12,1 l pro Klörperboden wäre bei halber Füllung des Behälters ein Volumen von 6,05 l erreicht. Die Näherung weicht also weniger als einen Liter ab. Das ist für die hier ausgeführten Berechnungen ausreichend genau.

Für die Messung des Füllstandes ist jedoch nicht nur die Form des Behälters ein wichtiger Faktor, sondern auch die Art des Sensors. Da es sich dabei um einen Bypass handelt, wird der Füllstand des Behälters nicht direkt gemessen, sondern über eine Kopplung zwischen Behälter und Bypass. Die Abweichungen, die diese indirekte Messung erzeugt, gilt es in der Auswertung der Messsignale zu berücksichtigen.

Der Behälter hat einen Innendurchmesser von circa 447mm, während der Mittenabstand der Flanschanschlüsse des Sensors 520mm beträgt. Diese Abweichung muss rechnerisch ausgeglichen werden. Eine zusätzliche Erschwernis bildet dabei das 4-20mA-Ausgangssignal des Sensors, das für die Verarbeitung in der Messbox in ein Spannungssignal umgewandelt werden muss (vgl. Kapitel 6.2.4.2).

Das minimale Eingangssignal von 1,872V ($\equiv 4\text{mA} * 468\Omega$) entspricht daher nicht einer Füllstandhöhe von 20%, sondern dem minimalen Signal des Sensors, also einem Füllstand von 0mm am Sensor. Das entspricht wiederum einer Füllstandhöhe von -36,5mm im Behälter.

Der Füllstand lässt sich über folgende Formel vom Signaleingang in die tatsächliche Füllstandhöhe umrechnen.

$$h_{F\ddot{u}llstand} = \frac{520\text{mm}}{(20 - 4)\text{mA} * 468\Omega} * U_{Signal} - \frac{(520 - 447)\text{mm}}{2}$$

$$h_{F\ddot{u}llstand} = 69,44 \frac{\text{mm}}{\text{V}} * U_{Signal} - 36,5\text{mm}$$

Dabei gilt:

$$U_{Signal,min} = 1,872 + \left(\frac{1}{69,44} \frac{\text{V}}{\text{mm}} * 36,5\text{mm} \right) = 2,3976 \text{ V}$$

Rechnet man den Mindestfüllstand von 30mm dazu ergibt sich:

$$U_{Signal,min} = 1,872 + \left(\frac{1}{69,44} \frac{\text{V}}{\text{mm}} * (36,5 + 30)\text{mm} \right) = 2,8296 \text{ V}$$

- Volumenstromberechnung mittels der Wasserzähler-Messwerte (Impulsanzahl n)

$$\dot{V} = 0,25 \frac{\text{l}}{\text{Impuls}} * \frac{n \text{ Impuls}}{T} = 0,25n \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

- Volumenstrom der Pumpen anhand der Stromaufnahme und der Datenblätter

$$\dot{V}(I) = (-0,0068 * I + 0,1365) \frac{\text{l}}{\text{s} * \text{A}}$$

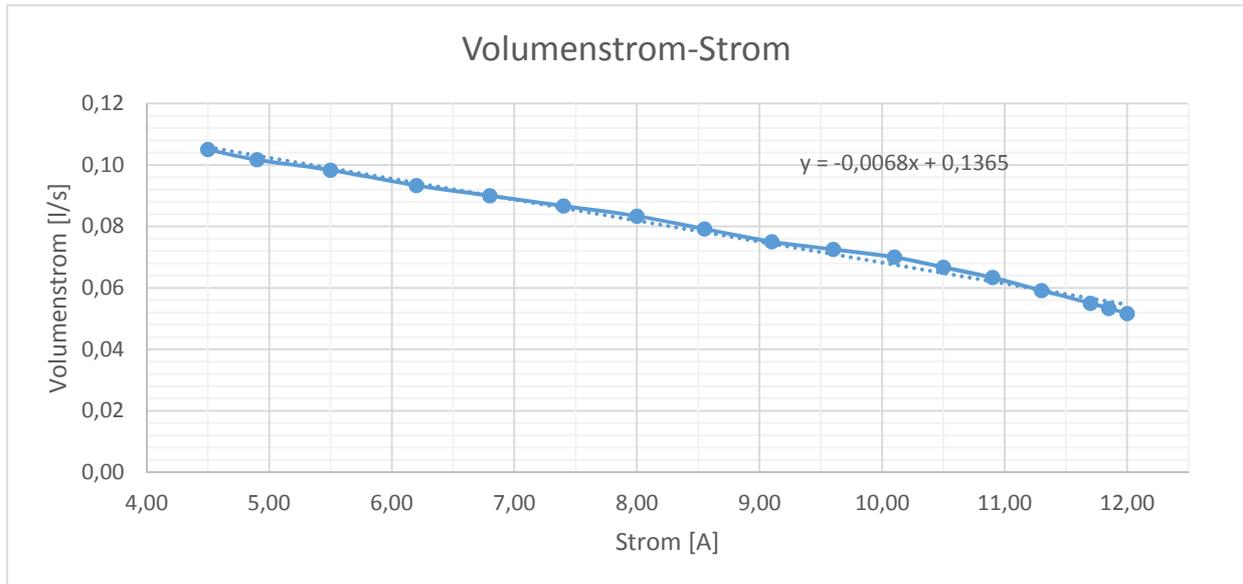


Abbildung 6-18: Diagramm Pumpenleistung: Volumenstrom in Abhängigkeit des Stromes
Quelle: Eigene Darstellung

Der in Abbildung 6-18 dargestellte Graph zeigt einen lineareren Zusammenhang zwischen Stromaufnahme und Volumenstrom der Pumpen. Die in Microsoft Excel erstellte Ausgleichsgrade (gepunktete Linie) weist gerundet die oben genannte Funktion auf. Der lineare Zusammenhang passt zu dem theoretisch annähernd linearen Verhalten der Membranpumpen. Zusätzlich müssen alle Signale der Messinstrumente (ähnlich der Umrechnung des Volumenstroms) in die benötigten Messgrößen umgerechnet werden. Dazu gehören derzeit der Füllstand des Behälters (gemessen als Füllstandhöhe, Umrechnung s.o.) und die Leistungen der Pumpen und des Generators.

6.3 Elektro-hydraulisches (Steuer-) Schaltbild der Anlage – Zusammenfassung

Um den Ablauf der Kommunikationen zwischen dem LabJack U6 und den einzelnen Geräten zu verdeutlichen, wird ein elektro-hydraulisches Schaltbild der Anlage verwendet, um daran die einzelnen Kommunikationsabläufe der Anlage (und der Software) zu erläutern.

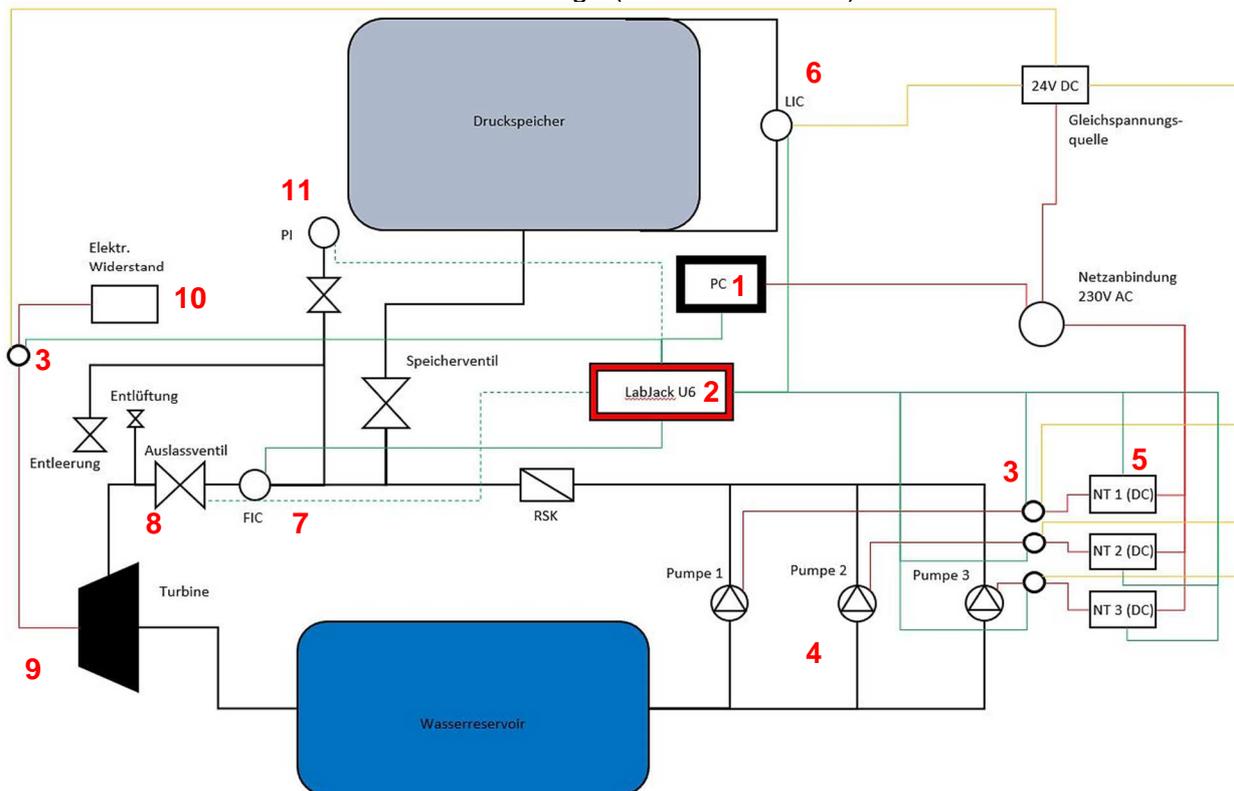


Abbildung 6-19: R&I der umgebauten Anlage (Originalgröße in Anhang 11)

Quelle: Eigene Darstellung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die hydraulischen Anpassungen und Optimierungen beschrieben, ebenso die Erstellung der Steuersoftware mit der dazugehörigen Steuer- und Leistungselektronik. Um ein besseres Verständnis vom Gesamtbild der Anlage zu erhalten, sollen die gewonnen Erkenntnisse hier kurz zusammengefasst werden. Dazu eignet sich am besten ein vollständiges Schaltbild mit allen zusammenwirkenden Komponenten. Komponenten, die nicht vom Zusammenwirken von Hydraulik und Elektrik abhängig sind, werden an dieser Stelle nicht erneut beschrieben. Die genannten Zahlen dienen dabei als Verweise auf die einzelnen Komponenten (vgl. Abbildung 6-19).

Kern der Anlage stellt der PC (1) mit der installierten MATLAB-App dar. Von ihm gehen alle Steuerbefehle an den LabJack (2) und werden dort in Steuersignale gewandelt. Alle Messsignale wiederum werden von (2) erfasst und dann über die gleiche Verdingung an (1) übergeben.

Bei der Steuerung handelt es sich aktuell ausschließlich um die Steuerung der Pumpen (4), die im Pumpbetrieb der Anlage Wasser in den Druckspeicher fördern und dadurch die Wassermenge und den Druck im Behälter erhöhen. Dabei werden die Pumpen nicht direkt gesteuert, sondern die Netzteile (5), die für die Stromversorgung der Pumpen sorgen. Der tatsächlich von den Pumpen aufgenommene Strom wird durch die Gleichstromsensoren (3) erfasst und als Messsignal an (2) zurückgegeben. Die Wassermenge im Druckspeicher wird durch die Bypass-Füllstandmessung (6) erfasst und geht ebenfalls als Signal zurück an (2).

Im Turbinenbetrieb wird (5) nicht angesprochen, dafür wird das Auslassventil (8) geöffnet. Aktuell geschieht dies manuell. Sollte im späteren Verlauf ein angetriebenes Ventil verbaut werden, würde dieses ebenfalls ein Signal von (2) erhalten und je nach Antrieb auch eine

Stellungsrückmeldung geben, die in (1) verwertet werden könnte. Denkbar wäre auch eine Ergänzung von (6) um ein Mindestfüllstandsignal, das direkt zur Schließung von (8) führen würde. Im Turbinenbetrieb strömt das Wasser durch den Wasserzähler (7), der hier als Durchflussmessung dient. (7) gibt ebenfalls ein Signal an (2) zurück, das in (1) in einen Volumenstrom umgerechnet wird. Strömt das Wasser durch (7) und (8) kommt es letztendlich auch in der Turbine (9) an. Die Turbine treibt derzeit einen Gleichstromgenerator an, der an eine Last in Form eines elektrischen Widerstandes (10) angeschlossen ist. Auch der Ausgangsstrom des Generators wird mit einem Sensor (3) erfasst und als Signal an (2) übergeben. So kann für einen Versuch die Leistung von (4) und (9) in (1) erfasst und abgebildet werden.

6.4 Smart Grid Integration

Die Integration der Anlage in ein Smart Grid wird in dieser Arbeit lediglich vorbereitet, da kein Smart Grid zum Testen möglicher Funktionen vorhanden ist. Eine genauere Anpassung ist somit erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich und sinnvoll.

```
try
    FSZ = evalin('base','FSZ');
    if exist('FSZ') == 1
        if FSZ(1) == 1
            app.AutomatikmodusButton.Enable = 'on';
        elseif FSZ(1) == 0
            app.AutomatikmodusButton.Enable = 'off';
        end
        if FSZ(2) == 1
            StartButtonPushed(app);
        end

        app.TextArea.Value = {char(13);char(13);char(13);'Fernsteuerzugriff'};
    else
        app.TextArea.Value = {char(13);char(13);'Kein';'Fernsteuerzugriff'};
    end
catch
    app.TextArea.Value = {char(13);char(13);'Kein';'Fernsteuerzugriff'};
end
```

Abbildung 6-20: MATLAB: Code für Fernsteuerzugriff durch ein Smart Grid
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Der Zugriff durch ein Smart Grid auf die Anlage (hier „Fernsteuerzugriff“, abgekürzt „FSZ“, genannt) erfolgt durch einen Vektor mit einer Spalte und beliebig vielen Zeilen, der über die App aufgerufen und ausgelesen wird. Beispielhaft wurden hier die ersten beiden Zeilen des Vektors mit grundlegenden Funktionen belegt.

Der Fernsteuerzugriff erfolgt allein durch das Vorhandensein der Variable „FSZ“ im MATLAB-Workspace (vgl. Abbildung 6-20, Zeile 3). Ist die Variable vorhanden, wird sie in die App geladen. Anschließend erfolgen der Reihe nach die Abfragen zu den einzelnen Werten des Vektors. Bei den hier verwendeten Beispielen sind nur 1 und 0 als Wert sinnvoll. Der erste Wert des Vektors bestimmt dabei das „Overwrite“-Recht. Ist der Wert 1 bleibt der Automatikmodus-Button freigeschaltet und die Anlage kann über die App gesteuert werden, sobald der Button betätigt wurde. Das Overwrite-Recht liegt also beim Anwender. Ist der erste Wert von FSZ dagegen 0, wird der Button deaktiviert und das Overwrite-Recht bleibt auf Seiten des Smart Grid (vgl. Abbildung 6-20, Zeile 4 bis 8).

Der zweite Wert des Vektors dient zum Starten der App (siehe Abbildung 6-20). Ist dieser Wert 1 wird, wie bei Betätigung des Start-Buttons, die Anlage gestartet. Da zurzeit aber kein weiterer Code für den Fernsteuerzugriff hinterlegt ist, würde sich die Anlage nicht mehr stoppen, beziehungsweise die App nicht ordnungsgemäß beenden lassen. Für die weitere Umsetzung des Fernsteuerzugriffs empfiehlt es sich, die anderen einzulesenden Parameter entweder chronologisch vor die Start-Funktion zu setzen oder diese zumindest vorher über die StartUp-Funktion einlesen zu lassen. Ohne die vorgelagerte Übergabe von anderen Parametern würde die Anlage zwar starten, aber durch den hinterlegten Ausgangszustand würden weder Pumpen noch Turbine betrieben. Das Ausgangsventil könnte zwar manuell betätigt werden, dass wäre beim Tausch gegen ein automatisches Ventil ebenfalls nicht mehr möglich. Die App würde also keine Funktion erfüllen, da sie sich innerhalb der Schleife der Messwerterfassung befindet und diese durch die Sperrung der Bedienoberfläche nicht unterbrochen werden kann.

Eine Erweiterung dieser Funktion ist für eine spätere Integration in ein Smart Grid daher unumgänglich. Für eine solche Erweiterung können zusätzliche Abfragen des FSZ-Vektors

analog zu den bereits vorhandenen hinterlegt werden. Eine feinere Aufgliederung durch die Verwendung von mehr Eingangswerten als 0 und 1 wäre dabei ebenfalls denkbar. Eine Anwendung dafür könnte die Anzahl der zu betreibenden Pumpen sein. Dafür könnte der Wert zwischen 0 und 3 liegen und würde dann in einer gewünschten Reihenfolge die Pumpen anschalten.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass es theoretisch von Vorteil wäre, die Funktion für den Fernsteuerzugriff aus der App auszulagern, um mögliche Konflikte zu umgehen und eine klare Trennung zwischen den beiden Zugriffsarten herzustellen. Da es im Moment nur eine rudimentäre Beispielfunktion gibt, wird der Umstand genutzt, dass die Funktionen für die Steuerung der Anlage bereits in den Callbacks hinterlegt sind. Diese Callbacks werden auch durch den derzeitigen Fernsteuerzugriff genutzt. Eine externe Funktion hätte keinen Zugriff auf diese Callbacks, da sie innerhalb der App unveränderlich als private Methoden („methods (Access = private)“) hinterlegt sind. Das hat zur Folge, dass eine externe Fernsteuerfunktion von Grund auf neu programmiert werden müsste. Es könnten lediglich die bereits verwendeten Unterfunktionen der App genutzt werden. Für diesen Zweck wäre es möglich, die Funktionen zu öffentlichen Methoden („methods (Access = public)“) umzudeklariieren.

7 Test und Anpassung von Anlage und Steuersoftware

Nachdem die Anlage zu großen Teilen umgebaut wurde und die Software weitestgehend ohne Test an der finalen Hardware programmiert wurde, ist ein ausführlicher Test einzelner Komponenten von Hardware und Software notwendig. In erster Linie muss dabei das Zusammenwirken von Hardware und Software getestet und sichergestellt werden.

7.1 Vermessung der Turbine (Hardwaretest)

Wie aus Kapitel 5.1.1.1 hervorgeht, ist über die Turbine nicht viel bekannt. Und auch die Verlässlichkeit der angegebenen Daten ist fraglich (vgl. Tabelle 5-5). Aus diesem Grund soll die Turbine vermessen werden, um einen geeigneten Betriebszustand zu finden. Dabei sind vor allem zwei Einstellparameter von großer Bedeutung: der Vordruck des Druckspeicherbehälters und der eingestellte elektrische Widerstand des Schiebewiderstandes (vgl. Kapitel 5.3.2.3).

Diese beiden Parameter werden unabhängig voneinander variiert. Dabei werden in mehreren Messreihen verschiedene Werte aufgenommen. Dazu gehören der Druck zu Beginn und am Ende der Messung, die Füllstandveränderung (also das durch die Turbine geströmte Volumen), der Öffnungswinkel des Auslassventils (geschätzt, im Normalfall bei voller Öffnung 90°), der gemessene Strom (Angabe als Bereich über die Versuchsdauer), die gemessene Spannung am Lastwiderstand (Angabe als Bereich über die Versuchsdauer), der innere Widerstand des Generators und die Versuchsdauer. Diese Werte werden mit den theoretischen Angaben für Spannung und Leistung aus Tabelle 5-1, die sich für die entsprechenden Fallhöhen (bzw. Drücke) ergeben sollten, verglichen. Auch die in Tabelle 5-5 ergänzten Werte für Ankerstrom und Lastwiderstand werden mit den Messungen verglichen. Die gesammelten Messwerte dieser Versuche finden sich in Anhang 15: Vermessung der Turbine.

Nachdem Werte für den Vordruck und den Lastwiderstand ermittelt wurden, wird im Weiteren noch der Öffnungswinkel des Auslassventils variiert, um die Versuchszeit weiter zu verlängern, ohne dabei zu großen Einfluss auf die Leistungsabgabe zu nehmen.

7.1.1 Versuchsdurchführung

Um die durchgeführten Versuche und die damit erzeugten Ergebnisse nachvollziehen zu können, soll das Vorgehen bei der Versuchsdurchführung kurz beschrieben werden.

Die Vermessung wird in mehrere Abschnitte unterteilt. In jedem Abschnitt werden andere Voreinstellungen für Vordruck und Lastwiderstand gewählt. Zu Beginn wird ein Lastwiderstand von $5,6\Omega$ und ein Vordruck von 6bar gewählt. Die Anlage wird dann gefüllt, bis der Behälter einen Druck von 10bar aufweist. Während des Versuchs werden die Multimeter beobachtet. Da Strom und Spannung nur an den Multimetern abgelesen werden können, wird ein Durchlauf bei der Behälterentleerung in mehrere Schritte unterteilt.

Anschließend wird der Versuch zunächst mit geänderten Lastwiderstand wiederholt. Dazu wird der Widerstand einmal erhöht und einmal verringert und jeweils ein Durchlauf vermessen.

Dieser Prozess wird anschließend mit geänderten Vordruck wiederholt. Dabei sind vor allem die Versuchsdauer und das Verhältnis von Füll- zu Entleerungsdauer von Bedeutung. Aber auch die Leistungsdaten der Turbine werden weiterhin untersucht.

Nachdem geeignete Werte für Vordruck und Lastwiderstand ermittelt wurden, wird der Versuch mit variierenden Öffnungswinkeln des Auslassventils wiederholt.

7.1.2 Analyse der Versuchsergebnisse

Durch die Variation der beiden Voreinstellungen (Vordruck und Lastwiderstand) ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse, mit denen ein möglichst optimaler Betriebsbereich für die Turbine gefunden werden soll.

Ein geringerer Widerstand führt zu niedrigeren Spannungen und erhöhten Strömen (Ergebnis entspricht dem Ohm'schen Gesetz). Das führt teilweise zu einer verbesserten Leistungsausbeute (bis zu 130W statt den angegebenen 110W). Allerdings ist es fraglich, ob die Bauteile des Generators dafür ausgelegt sind, dauerhaft einen Strom zu leiten, der um den Faktor zwei bis drei größer ist, als der aus dem Datenblatt errechnete. Ein höherer Widerstand führt dementsprechend zu höheren Spannungen und niedrigeren Strömen. Generell nimmt die Leistung oberhalb von 5Ω und unterhalb von 3Ω deutlich ab (vgl. Kapitel 5.3.2.3, $4-6\Omega$ nach Datenblatt). Eine genauere Eingrenzung ist aufgrund der groben Einstellmöglichkeiten der Schiebewiderstände nicht möglich und muss einzeln ausgetestet werden.

Wird der Vordruck des Behälters abgesenkt (4bar im Versuch), verlängert sich durch das höhere Füllvolumen des Behälter (fast 90l statt 65-70l) die Dauer der Entleerung, aber auch die von der Turbine abgegebene Leistung sinkt noch deutlich ab, sodass durch die letzten 10-15l aus dem Speicher im Mittel weniger als 50W erzeugt werden.

Ein höherer Vordruck als 6bar wurde nach den ersten Versuchen nicht durchgeführt, da sich die Versuchszeit durch das kleiner werdende Füllvolumen noch weiter verkürzen würde. Eine kürzere Versuchszeit wäre hinsichtlich der späteren Versuche und in Betracht auf die Smart Grid-Integration nicht sinnvoll.

Die Veränderung des Öffnungswinkels des Auslassventils ergab, dass durch eine Verringerung des Öffnungswinkels auf geschätzte 30° eine Steigerung der Versuchszeit um knapp eine Minute möglich ist, ohne dabei eine merkliche Minderung der Leistungswerte zu verursachen. Bei kleineren Öffnungswinkeln (15° im Test) kommt es hingegen zu Leistungseinbußen, während größere Öffnungswinkel (45° im Test) nur sehr wenig bis gar keinen Einfluss auf die Versuchszeit haben.

Als Ergebnis des Tests wird ein Widerstand von $4,2\Omega$ als Last eingestellt. Das widerspricht unerklärlicherweise der in Kapitel 5.3.2.3 erwähnten Theorie, dass der Lastwiderstand zur maximalen Leistungsausbeute genau so groß sein muss wie der innere Widerstand des Generators ($\sim 0,9\Omega$). Unter Umständen könnte die Leistung zwar bei einem so geringen Lastwiderstand durch den hohen Strom ($>12A$) wieder ansteigen. Eine so große Überschreitung der vorgegebenen Werte ($\sim 4,5A$) für den Strom wird aber nicht als praktikabel erachtet und wäre auf Dauer wahrscheinlich schädlich für den Generator.

Auf der hydraulischen Seite wird ein Betriebsbereich von 5bar (Vordruck bei leerem Speicher, durch Druckluftbeaufschlagung) bis 10bar (Maximaldruck bei gefülltem Speicher) für die Turbine und damit für die gesamte Anlage festgelegt.

Daraus ergibt sich ein Leistungsbereich von circa 130W bis 56W für die Turbine bei einem Ankerstrom zwischen 5,5A und 3,8A und einer resultierenden Entleerungszeit von ungefähr 4:00min (bei voller Ventilöffnung verkürzt sich die Entleerungszeit auf ca. 3:00min).

7.2 Funktionstest der Anlage im Betrieb (Softwaretest)

Durch das Testen und Vermessen der Turbine konnten die hydraulischen und elektrohydraulischen Komponenten weitestgehend auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft werden. Noch nicht getestet wurde dabei die Funktionsfähigkeit der (Steuerungs-)App, die auch die elektrischen Sensoren in der Anlage betrifft. Da die App zentraler Punkt dieser Arbeit ist, muss sie ausführlich getestet und im Notfall angepasst werden. Bei diesem Test sollen alle vorhandenen Hardwarekomponenten hinsichtlich ihrer korrekten Kommunikation mit der Messbox untersucht werden. Die Sensor-Signale müssen dabei hinsichtlich der zu Grunde liegenden Messwerte teilweise überschlägig abgeschätzt werden, da es keine verlässlichen vergleichbaren Messwerte gibt.

Getestet werden:

1. Die Pumpen und die Steuerung über die Schalter
2. Der Stromsensor des Generators
3. Der Füllstandsensor
4. Der Durchflusssensor
5. Die App (alle Funktionen, die bei korrekter Funktionsweise der vorangegangenen Komponenten getestet werden können)

7.2.1 Pumpensteuerung

Die Pumpensteuerung funktioniert so, wie gedacht. Es müssen lediglich die Steuerspannungen etwas abgesenkt werden. Bei der vorgegebenen Steuerspannung für den Spannungsgrenzwert erreicht das Netzteil fast 14V statt der gewünschten 12V. Das lässt darauf schließen, dass die Netzteile mehr Spannung (und wahrscheinlich auch mehr Strom, dementsprechend auch mehr Leistung) zur Verfügung stellen können, als auf dem Datenblatt ausgewiesen.

Rechnerisch leisten die Netzteile ungefähr:

$$V_{max,NT} = \frac{V_{Steuer,max}}{V_{Steuer,neu}} * V_{NT,soll} = \frac{5 V}{3,275 V} * 12 V = 18,3 V$$

Der Grenzwert für die Stromstärke kann nicht ausgetestet werden, da die Pumpen im Betrieb bereits die vorgesehenen 11,8A nicht benötigen. Laut der mitgelieferten Leistungstestberichte stellen die Netzteile maximal 43,5A und 16,3V bereit. Da die Spannungsgrenze in der Nachberechnung deutlich überschritten ist, muss davon ausgegangen werden, dass auch die Stromgrenze deutlich höher liegt. Da die Probe an der Obergrenze nicht durchgeführt werden kann, muss eine Untergrenze getestet werden.

Bei 1V Steuerspannung leistet das Netzteil ungefähr 6,8A und bei 1,2V sind es 8,8A. Das würde bedeuten, dass für 11,8A mindestens 1,7V nötig wären. Da eine aktive Strombegrenzung bei den durchgeführten Versuchen nicht beobachtet werden konnte, wird die berechnete Steuerspannung von 1,475V (theoretisch ca. 10A, im Versuch aber bereits überschritten) beibehalten.

7.2.2 Generatorleistung

Der Stromsensor arbeitet wie erwartet. Es gibt lediglich minimale Abweichungen zur parallelen Messung mit einem Multimeter. Diese betreffen aber maximal die zweite Nachkommastelle, teilweise auch nur die dritte. Bei der Vermessung wurden auch kleinere Abweichungen zwischen Eingangsstrom und Spannungssignal festgestellt. Beide Abweichungen sind aber so gering, dass sie auch in Summe nur einen minimalen Fehler verursachen. Daher wird keine Ausgleichsrechnung ergänzt, zumal sich bei den Abweichungen keine Systematik erkennen lässt.

7.2.3 Füllstand

Genau wie die Pumpensteuerung und die Messung der Generatorleistung funktioniert auch die Füllstandmessung. Auch hier gibt es aber kleinere Einschränkungen. Die erste betrifft den

Schwimmer (Model SK661), der die Reed-Schalter auslöst und die Analoganzeige steuert. Dieser Schwimmer ist für Hydrauliköl ($\rho \approx 860 \frac{kg}{m^3}$) kalibriert. Mit einer Dichte von $740 \frac{kg}{m^3}$ würde er ungefähr 202mm eintauchen. Da der Behälter aber mit Wasser ($\rho \approx 1000 \frac{kg}{m^3}$) gefüllt wird, taucht der Schwimmer nur circa 174mm ein. Daraus ergibt sich eine Differenz von 28mm, die für die Software berücksichtigt werden muss (vgl. Anhang 21: Mail Bühler Technologies). Um weitere Ungenauigkeiten durch eine zusätzliche Umrechnung auszuschließen, wird das Spannungssignal bei leerem Behälter gemessen und als Minimum angenommen. Für den leeren Behälter wird eine Spannung von 3,03V gemessen. Durch die Angaben des Herstellers kann für die App auch auf die Berechnung einer Dichtekorrektur verzichtet werden. Durch die ausgeführten Kontrollmessungen ergeben sich ohnehin deutlich verlässlichere Werte, da bei den Messungen automatisch alle realen Umstände berücksichtigt werden.

Für den vollen Behälter ergibt sich ein Spannungssignal von 5,9V, was einer Füllstandhöhe von circa 200mm entspricht.

Da der Schwimmer bei den verhältnismäßig langsamen Befüllungen und Entleerungen im Rohr nicht gut gleitet, ist es notwendig, während des Betriebes genau auf den Druck zu achten, da diese Anzeige eine verlässlichere Aussage über den Zustand der Anlage zulässt. Die bereits in der Software integrierten „Schaltpunkte“ für den Mindestfüllstand können so nicht genutzt werden.

7.2.4 Volumenstrom

So wie in Kapitel 6.2.4.5 beschrieben, konnte die Volumenstrommessung nicht umgesetzt werden. Es konnte keine Ursache für den Fehler festgestellt werden, aber ohne die Implementierung eines Timers auf dem vorangehenden Digital-I/O (in diesem Fall FIO2) gibt die Software einen Fehler für den Counter aus. Daher wird ein Timer aktiviert. Dieser belegt FIO2, wodurch der Counter von FIO2 (vgl. Kapitel 5.3.2.2, Abbildung 5-18) auf FIO3 verschoben wird. FIO2 kann damit für weitere Anschlüsse nicht mehr genutzt werden.

Die Erfassung der Impulse erfolgt wie vorgesehen und die Software berechnet daraus den Volumenstrom. Durch die relativ grobe Frequenz des Sensors von 1 Impuls alle 0,25l wirkt der Volumenstrom in der Anzeige stufig. Eine feinere Frequenzabtastung könnte diesem Effekt eventuell etwas entgegengewirken, allerdings liegt das Hauptproblem in der groben Auflösung des Sensors.

Während der Sensor in separaten Tests einwandfrei funktioniert, zeigen sich im Realbetrieb der Anlage immer wieder Schwierigkeiten bei der Signalerfassung. Der Fehler tritt immer dann auf, wenn in der App vom Pump- auf den Turbinenbetrieb umgeschaltet wird, nachdem der Pumpbetrieb einige Zeit aktiv war.

7.2.5 Steuersoftware

Die Steuerung der Pumpen funktioniert. Über die Schalter der App können die Pumpen je nach Betriebszustand ein- und ausgeschaltet werden. Auch die Erfassung und Wiedergabe der Messwerte erfolgt wie vorgesehen. Lediglich die Speicherung der Messwerte und damit verbunden deren Anzeige in der Oberfläche scheinen in manchen Fällen nicht richtig zu funktionieren. Jedoch lässt sich dieser Fehler nicht gezielt reproduzieren, weshalb keine Lösung für dieses Problem gefunden werden konnte.

Während des Versuchs erscheint im Command Window von MATLAB immer wieder die Fehlermeldung „Warning: Integer operands are required for colon operator when used as index“. Diese Fehlermeldung bezieht sich auf die Zählschleife für den Impulsausgang. Die MATLAB-Hilfe ergab leider keine Lösung für das Problem, da die angebotenen Lösungen ausschließlich auf Schleifen mit fester Länge (z.B. „for n = 1:1000“ o.Ä.) basieren. Da die Größe der Zählmatrix mit jedem Schleifendurchlauf wächst und MATLAB jedes Mal die vorangegangenen Ergebnisse kopiert, wird ein erhöhter Rechenaufwand erzeugt. Durch den verhältnismäßig geringen Umfang der Matrix hält sich dieser zusätzliche Aufwand aber in Grenzen, sodass auf eine umfangreiche

Korrektur verzichtet wird. Stattdessen wird das Command Window nach beenden der App mit dem „clc“-Befehl geleert.

7.3 Test der Pumpen

Für die Vermessung der Turbine muss der Behälter immer wieder gefüllt werden. Diese Befüllungen lassen sich gut mit einem Test der Pumpen kombinieren. Dabei geht es weniger um die optimale Betriebsweise, sondern vielmehr darum, ob die Pumpen über den gesamten Arbeitsbereich problemlos betrieben werden können.

Einzelnen arbeiten alle Pumpen reibungslos und benötigen zum Erreichen des angestrebten Druckes nicht die volle Leistung. Allerdings kann zumindest am Manometer kein Druck von 10bar eingestellt werden. Grund dafür sind wahrscheinlich die geringen Verluste der Rohrleitung und die hydrostatischen Unterschiede. Geht man nach dem Manometer, so stellt sich ein maximaler Druck von ungefähr 9,9bar in der Anlage ein. Allerdings kann bei der Befüllung kurz vor dem Erreichen der 10bar-Grenze ein „Zittern“ im Manometer festgestellt werden. Dies kann ein Zeichen dafür sein, dass im Behälter die 10bar erreicht werden und das Sicherheitsventil wie geplant auslöst wird oder die Selbstabschaltung der Pumpen bei 150psi greift (vgl. Kapitel 5.1.1.2).

Um diesen Punkt zu erreichen, wurden an den Netzteilen der Pumpen Ströme von 10,5A bis 11,5A abgelesen, während gleichzeitig die Spannungsbegrenzung (12V) der Netzteile ausgelöst wird. Da bei 12A laut Datenblatt 150psi erreicht werden sollten, was wiederum 10,3bar entspricht, passen die gemessenen Werte ungefähr zu den zu erwartenden Ergebnissen. Die Ströme fallen dabei etwas geringer aus, als vorab berechnet. Dennoch scheinen die Angaben zur Pumpenkennlinie nicht vollständig korrekt zu sein beziehungsweise nicht für diese Anlage zutreffend.

Ein Problem tritt bei den Pumpen dann auf, wenn sie gleichzeitig betrieben werden. Die Ursache dafür konnte in den Versuchen nicht geklärt werden, da es keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen den auftretenden Problemen und den messbaren Parametern gab. Das Problem besteht grundsätzlich darin, dass die Pumpen sich in unterschiedlichen Betriebspunkten so stark gegenseitig beeinflussen, dass es zu erhöhten Schwingungen in der Anlage kommt. Eine mögliche Ursache wäre ein asynchrones Arbeiten der Pumpen. Das würde bedeuten, dass die Membrankammern der Pumpen so versetzt betätigt werden, dass die Pumpen direkt gegeneinander arbeiten. Die erkennbaren Schwingungen treten dabei häufiger in den höheren Druckbereichen (>8bar) auf. In den unteren Druckbereichen (4-6bar) konnten sie in den Versuchen hingegen nicht festgestellt werden. Das Verhalten lässt sich aber nicht durch ein versetztes Ein- und Ausschalten der Pumpen steuern. Werden die Pumpen beispielsweise bei 5bar gestartet, arbeiten sie zunächst konfliktfrei. Nach einem nicht festzulegenden Zeitraum (oder einer Druckdifferenz) fängt die Anlage an sich „aufzuschwingen“. Teilweise lässt sich das unterbinden, indem einzelne Pumpen abgeschaltet werden. Schaltet man diese später wieder dazu, kann es erneut zu Problemen kommen. In manchen Fällen kann dadurch ein schwingungsfreier Betrieb provoziert werden.

Die einzige Methode, die sich in den Versuchen bewährt hat, bestand darin, die rechte Pumpe durchgängig zu betreiben und die anderen beiden Pumpen bei Schwingungen abzuschalten. Dabei erwies sich die mittlere Pumpe häufig als weniger anfällig für die Schwingungen.

Des Weiteren wurden beim gleichzeitigen Betrieb aller drei Pumpen ungewöhnliche Abweichungen in der Stromaufnahme der Pumpen festgestellt. In der Regel nimmt die rechte Pumpe am meisten Strom auf und die mittlere am wenigsten. Dabei stellt sich ungefähr eine konstante Differenz von 0,5A ein. Sobald die mittlere Pumpe alleine betrieben wird, steigt ihre Stromaufnahme allerdings über die der rechten Pumpe.

Aufgrund dieses Phänomens sollten die in Kapitel 6.2.4.5 gewählten Gleichzeitigkeitsfaktoren im dauerhaften Betrieb der Anlage beobachtet und gegebenenfalls angepasst werden.

7.4 Anpassungen aufgrund der Messergebnisse und Beobachtungen

Die erste Anpassung, die aufgrund der Tests durchgeführt wurde, betrifft die Abdichtung der Turbine. Da die Turbine auf der Unterseite nicht vollständig plan ist, bildet sie keine geeignete Dichtfläche, um in Kombination mit den KlingerSil-Dichtungen eine wasserdichte Verbindung herzustellen. Aus diesem Grund wird die Dichtung mit einem selbstklebenden EPDM-Band ersetzt, das zusätzlich von außen durch eine Silikonlage unterstützt wird. Auch die seitlichen Gehäuseecken werden von innen mit Silikon abgedichtet, da es dort im Betrieb ebenfalls zu leichtem Wasseraustritt gekommen ist.

Aufgrund der Probleme beim gleichzeitigen Betrieb der Pumpen wird eine füllstandabhängige Steuerung der Pumpen ergänzt (nahe dem maximalen Füllstand von 180mm werden 2 Pumpen (links und Mitte, 2 und 3) abgeschaltet und die Schalter deaktiviert (vgl. Abbildung 7-1)). Bei einem Füllstand von 198mm wird automatisch der StopButton betätigt.

Eine weitere Anpassung betrifft den Vordruck. Statt dem ursprünglich geplanten Betriebsbereich von 6bar bis 10bar wird dieser auf 5bar bis 10bar erweitert. Grund dafür ist in erster Linie die Versuchsdauer. Diese kann durch die größere Druckdifferenz und das dadurch erhöhte Füllvolumen deutlich gesteigert werden. Nachteilig an dieser Änderung ist, dass die Leistungsabgabe der Turbine im unteren Bereich noch geringer wird.

```
hFAbsch = 180; % Füllstandgrenze für Abschaltung von 2 Pumpen
if app.Messwerte(app.n,3) >= hFAbsch &&
strcmp(app.BetrZustd.Text, 'Pumpbetrieb') == 1
    % Pumpen ausschalten
    app.Pumpe2Switch.Value = 'Aus';
    app.Pumpe3Switch.Value = 'Aus';
    Pumpensteuerung(app.Pumpe1Switch.Value, app.Pumpe2Switch.Value,
app.Pumpe3Switch.Value, 1);
    % Schalter deaktivieren
    app.Pumpe2Switch.Enable = 'off';
    app.Pumpe3Switch.Enable = 'off';
end
% Pumpenabschaltung bei maximalem Füllstand als Überfüllungsschutz (Auslösen
des Sicherheitsventils)
hFMax = 198;
if app.Messwerte(app.n,3) >= hFMax &&
strcmp(app.BetrZustd.Text, 'Pumpbetrieb') == 1
    StopButtonPushed(app)
end
```

Abbildung 7-1: MATLAB-Code: Füllstandabhängige Pumpenabschaltung

Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Um die aufgenommenen Messwerte im Nachhinein einfacher auswerten zu können, wurde ein externes Skript erstellt (vgl. Anhang 5: Quellcode der App, Externe Funktion zur Auswertung der Messergebnisse), das anhand der im Workspace abgelegten Messwertdateien drei Werte berechnet: die eingespeicherte Energie (Pumpen), die ausgespeicherte Energie (Turbine) und den Speichergesamtwirkungsgrad (Verhältnis der beiden Energien). Da die Sensoren für die Pumpenleistung noch nicht vorhanden sind, kann zurzeit keine vollständige Auswertung erfolgen. Zumindest aber lässt sich die ausgespeicherte Leistung so berechnen und ein Wirkungsgrad ungefähr abschätzen. Zusätzlich wertet das Skript die einzelnen Zeitabschnitte aus. Es wird die Dauer des Turbinenbetriebs und des Pumpenbetriebs ausgelesen und als Vergleich die Gesamtdauer ausgegeben.

Aufgrund der fehlenden Stromsensoren zur Messung der Stromaufnahme der Pumpen kann die eingespeicherte Leistung nicht bestimmt werden. Um dennoch eine grafische Darstellung zu ermöglichen, wurden drei zusätzliche „Spinner“ in die Oberfläche integriert (vgl. Abbildung 7-2).

Mit diesen können die auf den Netzteilen angezeigten Werte für die Stromaufnahme der Pumpen eingegeben werden.

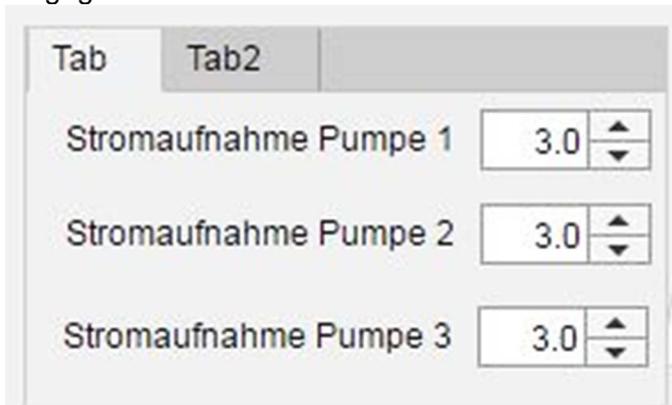


Abbildung 7-2: Spinner zur Einstellung der Stromaufnahme der Pumpen
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Diese Anpassung wurde als „TabGroup“ eingefügt, sodass im zweiten Tab immer noch die ursprüngliche Anzeige in der Oberfläche vorhanden ist. Es kann jederzeit zwischen beiden Tabs gewechselt werden. Bei der überdeckten Anzeige handelt es sich um die momentan funktionslose Druckanzeige.

Da die „u6_timer_counter“-Vorlage von LabJack einen geringeren Zeilenumfang besitzt und damit übersichtlicher ist als der timer-counter-Abschnitt aus der „e-functions“-Vorlage, wird der Code für die Abfrage der Volumenstrommessung geändert (vgl. Kapitel 6.2.3). Dabei wird auch der im Beispielcode integrierte Timer genutzt. Die Anschlussbelegung der Messbox bleibt dabei gleich (vgl. Kapitel 7.2.4).

Um den Fehler bei der Volumenstrommessung zu umgehen, wird die Funktion zur Zählung der Impulse geändert (vgl. Abbildung 7-3) und der Vektor, in den die Impulse geschrieben werden, wird zum Start der App bereits initialisiert und mit Nullen gefüllt (vgl. Abbildung 7-3). Außerdem werden in der neuen Zählschleife statt den Einsen die Nullen gezählt, da es sich bei dem Reed-Schalter im Wasserzähler (Volumenstromsensor) um einen Öffner handelt und dementsprechend die 0 den relevanten Impuls darstellt.

```
Alte Impulszählung:  
VS_Matrix(app.n,1) = app.t;  
VS_Matrix(app.n,2) = AnzVI;  
if app.t <= 5 && app.t > 0  
    VS = (sum(VS_Matrix(:,2))*0.25)/app.t;  
elseif app.t == 0  
    VS = 0;  
elseif app.t > 5  
    VS = (sum(VS_Matrix(app.t-5:app.t,2))*0.25)/5;  
End  
  
Neue Impulszählung:  
imax = 3;  
VS = 0;  
VS_Matrix(app.n) = AnzVI;  
if app.t >= imax  
    for i = app.n-(imax/app.T):app.n  
        if app.VS_Matrix(i) == 0  
            Anz = Anz+1;  
        end  
    end  
    VS = (Anz*0.25)/imax;  
else  
    VS = 0;  
end  
  
Initialisierung VS Matrix:  
app.VS_Matrix = zeros(1200/app.T,1);
```

Abbildung 7-3: MATLAB-Code: Impulszählung/ Volumenstromberechnung
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

7.5 Erzeugung der App (Packaging)

Nach dem erfolgreichen Test der Anlage und der entwickelten Steuerungssoftware kann die App verwendet werden. Um das auf verschiedenen Endgeräten (Desktop-PCs, Laptops etc.) einfach zu ermöglichen, wird die App mit Hilfe der „Package“-Funktion zu einer Stand-Alone-Version (.mlappinstall) umgewandelt (vgl. Abbildung 7-4). Diese kann auf jedem PC mit kompatibler MATLAB-Version installiert werden. Sie wird dabei direkt in die App-Bibliothek von MATLAB geladen und kann von da aus gestartet werden (vgl. Abbildung 7-5).



Abbildung 7-4: Beispiel: App-Packaging
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)



Abbildung 7-5: MATLAB App-Browser
Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

8 Fazit - Ergebnis

Die Aufgabe dieser Arbeit war es, ein möglichst funktionsfähiges Modell eines Pumpspeicherkraftwerkes zu erstellen und dieses für die Integration in ein Smart Grid-Modell vorzubereiten beziehungsweise die notwendigen Schnittstellen vorzusehen.

Zwar hat sich der Schwerpunkt im Laufe der Arbeit weg von der Softwareerstellung in Richtung Hardwareanpassung (Funktionsfähigkeit der Anlage) verlagert, wodurch letztlich ein funktionsfähiges Modell erstellt werden konnte, das weitestgehend zur Integration in ein Smart Grid vorbereitet ist. Lediglich die softwaretechnische Datenverarbeitung und Auswertung konnte bezüglich der Tiefe und Fehlersicherheit nicht im geplanten Umfang umgesetzt werden. Auch die Smart Grid-Schnittstelle besitzt nicht den vorgesehenen Umfang. Grund dafür ist unter anderem die fehlende Schnittstellenvorgabe (fehlendes Smart Grid-Modell).

Insgesamt kann gesagt werden, dass die Zusammenstellung und Anpassung der einzelnen Hardwarebestandteile aufgrund fehlender Vorlagen und Vergleichsmöglichkeiten deutlich schwieriger und zeitaufwendiger war, als zu Beginn angenommen. Allem voran die Beschaffung eines Ersatzbehälters für die Membrangefäße weicht deutlich von der ursprünglichen Aufgabenstellung ab (vgl. Kapitel 5.3.1), war aber für die Erfüllung der grundlegenden Aufgabe unumgänglich.

Das Ergebnis dieser Arbeit deckt sich dementsprechend nicht vollständig mit der Aufgabenstellung. Die Steuerungssoftware kann erst zur Integration in ein Smart Grid verwendet werden, wenn die Schnittstelle vollständig beschrieben ist und diese Beschreibung programmiertechnisch umgesetzt wurde. Dennoch konnte eine funktionsfähige Anlage mit zugeschnittener Steuerungssoftware entwickelt werden, die zumindest über eine Schnittstelle zur Smart Grid Integration verfügt.

Das entwickelte Pumpspeichermmodell nimmt bei der Einspeicherung über einen Zeitraum von etwas über 6min ungefähr 28Wh (ca. 300W bis 330W Pumpenleistung mit einem mittleren Volumenstrom von ca. 0,2l/s) an Energie auf und gibt innerhalb von etwa 3min bis zu 4,3Wh wieder ab (ca. 55 bis 140W Turbinenleistung mit einem mittleren Volumenstrom von ca. 0,4l/s)¹. Daraus ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von knapp 15%. Für diesen Prozess werden ungefähr 75l bis 80l Wasser innerhalb der Anlage bewegt.

Verglichen mit einem herkömmlichen Pumpspeicher oder anderen in Kapitel 3.1 genannten Konzepten sind dies eher geringe Werte, was zum einen an den ungünstigen Größenverhältnisse des Modells liegt, zum anderen an den hydraulischen Bauteile wie Pumpen, Turbine und die Rohrleitungen, da sie im Unterschied zu großen Anlagen nicht genau auf ihren Einsatzzweck ausgelegt sind.

MesswerteAugust162019105420

Eingespeicherte Energie: 101298.60J = 28.138Wh

Ausgespeicherte Energie: 15641.65J = 4.345Wh

Speichergesamtwirkungsgrad: 15.4%

Versuchsdauer: 574.0s

Gesamtdauer Pumpbetrieb: 384.0s

Gesamtdauer Generatorbetrieb: 179.5s

Abbildung 8-1: Messwertauswertung eines vollständigen Versuchsdurchlaufs

Quelle: Eigene Darstellung (MATLAB)

Auf der anderen Seite bietet der Aufbau des Modells auch Vorteile. Zum einen ist das Modell für einen Pumpspeicher sehr kompakt und lässt sich verhältnismäßig gut transportieren. Ein weiterer Vorteil ist die Anpassungsfähigkeit der Anlage. Zum Beispiel können durch die Einstellbarkeit des

¹ Die aufgeführten Kennwerte der Anlage wurden mit Hilfe des Auswerteskriptes (vgl. Kapitel 7.4) aus den Messwerten „kompletter Durchlauf“ erzeugt (vgl. Anhang 20, Abbildung 8-1).

Vordrucks die Versuchsdauer und Leistungsausbeute im Nachhinein an andere äußere Parameter, wie sie durch ein Smart Grid vorgegeben werden könnten, angepasst werden. Außerdem ist das Modell im Vergleich zu einem herkömmlichen Pumpspeicher sehr preiswert. Durch den reduzierten Softwareumfang wurden letztendlich deutlich weniger Testläufe benötigt als geplant. Daraus ergibt sich für zukünftige Projekte ein deutlich höherer Puffer an Lastwechseln als in Kapitel 5.3.1.4 angegeben. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden weniger als 100 Lastwechsel benötigt. Damit erhöht sich die Anzahl zulässiger Lastwechsel bis zur ersten Wiederkehrenden Prüfung im Sommer 2024 auf ungefähr 900 Stück.

9 Ausblick – Anpassungen von Software und Hardware

Obwohl die Anlage mit Abschluss dieser Arbeit vollständig einsatzbereit ist, gibt es einige Modifikationen und Erweiterungen, die für den Betrieb der Anlage sinnvoll sein könnten. Einige davon wurden bereits in Kapitel 5.55.4 vorgestellt. Zudem gibt es einige Arbeitsschritte, die in dieser Arbeit nicht abgeschlossen werden konnten und noch vervollständigt werden müssen. Es bleiben also einige Punkte offen, die sich in zwei Kategorien einteilen lassen: die notwendigen Modifikationen und die ergänzenden Modifikationen.

9.1 Notwendige Modifikationen

Notwendige Modifikationen sind Um- und Anbauten an der Hard- und Software der Anlage, die durchgeführt werden sollten, bevor die Anlage für Versuche genutzt wird beziehungsweise bevor die Versuche relevante Daten erzeugen können.

Der Fernsteuerzugriff der Anlage, der zur Smart Grid Integration vorgesehen ist, ist bis jetzt nur eine offene Schnittstelle. Diese Schnittstelle wird in der aktuellen App nur beispielhaft bedient. Für eine vollständige Integration muss diese Schnittstelle weiter ausgebaut und an einigen Stellen auch erweitert werden. Im derzeitigen Zustand ist die Schnittstelle nicht einsatzfähig, da es keine Möglichkeit gibt, die Anlage im Betrieb auch über diese Schnittstelle zu stoppen. Denkbar wäre dafür eine Abfrage innerhalb einer Schleife, die immer wieder einen Parameter für den Stopp oder den Weiterbetrieb abfragt (ein Beispiel dafür ist im Code hinterlegt, aber nicht ausreichend getestet). Für eine vollständige Integration fehlt zudem die andere Seite der Schnittstelle, das Smart Grid. Ohne dies zu kennen, ist es nur schwer möglich überhaupt Anforderungen zu generieren, die die Schnittstelle der App erfüllen muss. Für die Nutzung der derzeitigen Methode (vgl. Kapitel 6.4) ist es von großer Bedeutung, in welcher Reihenfolge die einzelnen Abfragen ablaufen.

Der Fernsteuerzugriff regelt indirekt auch das „Overwrite-Recht“ (kurz OWR). Es sollte klar definiert sein, welche Zugriffsart dieses OWR hat und was genau der jeweils andere Modus leisten kann und darf. Diese Entscheidung macht erst Sinn, wenn das Modell wie vorgesehen in ein Smart Grid integriert ist. Aktuell liegt das OWR im manuellen Betrieb der Anlage. Für die Smart Grid Integration wäre derzeit eine OWR für den Fernzugriff sinnvoller, mit der Ausnahme des manuellen Anlagenstopps für eventuell eintretende Notfälle.

In direktem Zusammenspiel mit der OWR-Frage steht auch die Nachrüstung eines automatischen Auslassventils (vgl. Kapitel 5.4 Punkt 3). Der Betrieb mit einem manuellen Ventil ist technisch zwar möglich und wurde für die Tests mit der Anlage so praktiziert, wäre für den dauerhaften Betrieb aber mit mehreren Risiken verbunden. Solange ein manuelles Ventil verbaut ist, besteht immer die Möglichkeit, den Anlagenbetrieb händisch zu stoppen beziehungsweise so weit zu manipulieren, dass die beiden größten Risiken (Überdruck im Speicher und Leerlaufen des Speichers) umgangen werden. Vor allem das Leerlaufen des Speichers ist bei der Benutzung eines manuellen Ventils ein erhebliches Risiko, da durch das verhältnismäßig geringe Restvolumen nur ein kurzes Zeitintervall zum Schließen des Ventils besteht.

Mit der Nachrüstung eines automatischen Ventils könnte auch die Checkbox für den Ventilstatus entfallen (vgl. Kapitel 6.1.1 Punkt (2)).

Alle bisher genannten Punkte hängen grundlegend mit dem Thema der Smart Grid Integration zusammen. Solange die Anlage für sich alleine steht, wären diese Anpassungen zwar sinnvoll, aber nicht unbedingt notwendig. Die Notwendigkeit ergibt sich erst in Verbindung mit dem Smart Grid und den damit verbundenen zusätzlichen externen Einflüssen.

Eine weitere wichtige Anpassung wäre die Ergänzung der Messwerte durch eine digitale Druckmessung (vgl. Kapitel 5.4 und Kapitel 6.1.1). Die Anzeige in der Benutzeroberfläche ist bereits vorhanden und auch der Code ist bereits innerhalb der Funktion Messwernerfassung vorgesehen. Dazu wird der Code für die Messwernerfassung des Füllstandsensors verwendet, da es sich bei dem Drucksensor voraussichtlich ebenfalls um einen Sensor auf Industriestandard (4-20mA-Signal) handeln wird. Lediglich der Umrechnungsfaktor und der Analogeingang für den

CB37 müssten angepasst werden (vgl. Kapitel 5.3.2.2). Für diese Modifikation lässt sich nicht genau sagen, ob sie tatsächlich notwendig ist oder nur eine nützliche Erweiterung darstellt. Im aktuellen Zustand der App wird der Messwert nicht benötigt, könnte aber bei der Datenerfassung dazu dienen, den Zusammenhang anderer Messwerte besser darzustellen.

Um die Leistung beziehungsweise die Stromaufnahme der Pumpen messen zu können, fehlen derzeit noch die dafür vorgesehenen Stromsensoren und die benötigte Erweiterung für die Messbox (CB37 Terminalboard). Die Sensoren müssen bestellt, verkabelt und getestet werden. Es kann dabei, wie in Kapitel 6.2.4.3 und 6.2.4.4 erwähnt, der gleiche Sensor verwendet werden wie für den Generator. In der Software sind die Signalerfassung und -auswertung bereits vorhanden, aber bislang nur teilweise getestet (CB37 Terminalboard ist noch nicht getestet). Das Terminalboard muss ebenso bestellt, angeschlossen, verkabelt und getestet werden. Eine kurze Erklärung für die Programmierung des CB37 findet sich in Anhang 19: Programmierhinweis für CB37. Laut dem Support der Firma LabJack können die Anschlüsse des Terminalboards genauso angesprochen werden, wie die Anschlüsse der Messbox. Da einige Anschlussbezeichnungen auf der Messbox und dem Terminalboard mehrfach verwendet werden, sollten diese nach Möglichkeit umgangen oder aber genau getestet werden.

Des Weiteren müssen für eine möglichst korrekte Messung der Stromstärke die zu vermessenden Leiter mittig durch die Öffnung des Sensors laufen. Zu diesem Zweck müssen wahrscheinlich einige kleinere Hilfskonstruktionen vor und hinter jedem Sensor angebracht werden. Eine andere Möglichkeit wäre, die Kabelführung direkt so zu planen, dass die Kabel bereits beim Verlegen mittig durch die Sensoren verlaufen.

Die Verkabelung der Anlage ist ein weiterer Punkt. Zurzeit ist die Anlage soweit verkabelt, dass sie funktionsfähig ist. Ein passendes Kabelmanagement wäre in Anbetracht der Vielzahl an Strom- und Signalkabeln durchaus sinnvoll und könnte die spätere Überarbeitung oder Ergänzung der Anlage vereinfachen. Außerdem sind einige der Messanschlüsse mit verlöteten Kabelenden umgesetzt (passende Stecker waren im Laborbestand nicht vorhanden).

Die Software wurde bis dato nur von ihrem Entwickler getestet. Aus diesem Grund und mit Blick auf die spätere Erweiterung wäre es sinnvoll, eine generelle Fehleranfälligkeit der App zu überprüfen und bei Bedarf einige Sicherheitsfunktionen zu implementieren.

Bei der Verkabelung des Füllstandsensors war kein Widerstand in benötigter Größe (500Ω) vorhanden. Daher wurde abweichend ein Widerstand mit 468Ω installiert. Sollten sich dauerhaft Probleme durch den kleineren Widerstand ergeben, muss dieser getauscht werden. In der Software wurden die Werte dementsprechend angepasst.

Wie in Kapitel 7.2.1 erläutert wurde, stimmen die tatsächlichen Spannungsgrenzen nicht mit den berechneten überein. Falls die Steuerspannungen geändert werden, sollte im Verlauf weiterer Projekte und Versuche an der Anlage darauf geachtet werden, ob es zu weiteren Abweichungen kommt.

Bei der Montage des Füllstandsensors musste festgestellt werden, dass der Sensor über einen erheblich stärkeren Bördel verfügt als angenommen. Daher können die für den Blindflansch verwendeten Schrauben nicht zur Montage des Sensors genutzt werden. Ersatzweise wurde ein zweiter Satz Schrauben bereitgestellt. Diese Schrauben sind nur bedingt geeignet, da es sich um verzinkte Schrauben handelt. Sie sollten zeitnah gegen Edelstahlschrauben ausgetauscht werden. Bei dieser Gelegenheit könnten auch Unterlegscheiben ergänzt werden.

Die Tests des Füllstandsensors haben gezeigt, dass der Schwimmer sich durch die langsamen Füllstandsänderungen häufiger im Rohr verkantet (vgl. Kapitel 7.2.3). Beim Befüllen ist das Problem deutlich weniger ausgeprägt, während es beim Entleeren teilweise vorkommt, dass sich der Schwimmer gar nicht senkt. Aufgrund dieses Problems wurde bereits eine Funktion der App eingegrenzt. Um eine bessere Funktionalität des Sensors zu gewährleisten, wäre es sinnvoll, den Schwimmer oder das Führungsrohr so zu modifizieren, dass ein Verkanten ausgeschlossen oder zumindest reduziert werden kann.

9.2 Ergänzende Modifikationen

Die ergänzenden Modifikationen betreffen jene Um- und Anbauten an der Hard- und Software der Anlage, die keine Einschränkung der Anlage darstellen, solange sie nicht umgesetzt wurden. Eine Umsetzung dieser Modifikationen könnte den Umgang mit der Anlage verbessern und sowohl die erzielten Ergebnisse als auch deren Möglichkeiten zur Auswertung optimieren.

Die erste ergänzende Modifikation könnte die Überarbeitung des Codes mit Blick auf die Integration in ein größeres System sein. Für den aktuellen Stand ist der Code funktionsfähig und so übersichtlich gestaltet, dass alle Einzelteile der App voneinander getrennt sind (mit Ausnahme der Messwertaufnahme, vgl. Kapitel 6.2.4). Sollte das Programm durch die Smart Grid Integration deutlich umfangreicher oder mit anderen Programmen zusammengelegt werden, könnte eine Neustrukturierung von Vorteil sein. Vor allem das Datenmanagement ist aufgrund des aktuell geringen Umfangs sehr einfach gehalten (zweidimensionale Matrix zur Messwertübergabe und – Speicherung, vgl. Kapitel 6.2.2.2). Ein Datenmanagement in Form von Cells anstatt der bisher verwendeten Arrays wäre denkbar.

Eine umfassende Modifikation der Anlage betrifft die Pumpen. Im höheren Druckbereich schaltet die App automatisch zwei der Pumpen ab, um das Auftreten von Schwingungen zu vermeiden. Aber auch im unteren Druckbereich entstehen diese Schwingungen gelegentlich. Teilweise handelt es sich dabei lediglich um Vibrationen der Pumpen, die sich untereinander verstärken. Um die daraus resultierenden akustischen und mechanischen Belastungen zu reduzieren könnten verschiedene Vorkehrungen getroffen werden:

1. Schwingungsdämpfende Halterung der Pumpen. Um den gewünschten Effekt zu erzielen, müssten dafür ebenfalls Schwingungskompensatoren in der Rohrleitung installiert werden.
2. Ein schallgedämmtes Gehäuse könnte die akustische Belastung der Pumpen reduzieren.
3. Für eine besser Ablesbarkeit und einen langfristigen Schutz des Manometers wäre es sinnvoll, dieses durch ein Glycerin-Manometer auszutauschen. Durch die Füllung werden kleinere Schwingungen und Vibrationen der Anlage gedämpft.
4. Die Pumpenabschaltung könnte durch einen am Wagen des Modells angebrachten Schwingungssensor unterstützt werden. Ein solcher Sensor und die damit verbundenen Versuche würden jedoch einen erheblichen Aufwand bedeuten und einen eher geringen Einfluss auf das Modell ausüben.

Auch die Turbine könnte durch eine Überarbeitung optimiert werden. Zum einen ist das Gehäuse nur provisorisch abgedichtet. Die langfristige Wirkung des Silikoneinsatzes ist fraglich. Außerdem könnte eine bessere Auslegung der Düse zu einer präziseren und effektiveren Nutzung des Wassers führen. Dadurch könnte die benötigte Wassermenge reduziert werden, wodurch wiederum die Versuchszeit verlängert würde. Auch die Schaufelräder der Turbine könnten neu konstruiert werden, um einen zusätzlich einen vergleichbaren Effekt zu erzielen.

Die Anpassung des Öffnungswinkels des Auslassventils hat bereits gezeigt, dass auch ein geringerer Wassermassenstrom kaum zu Leistungsverlusten führt. Durch eine Anpassung von Düse und Schaufeln könnte ein ähnliches Ergebnis ohne die Verluste durch das teilgeöffnete Ventil erzielt werden.

Die letzte technische Anpassung der Anlage betrifft eine Erweiterung der Software um ein „Maximum Power Point Tracking“ (kurz MPP-Tracking). Dafür wären ebenfalls zusätzliche Sensoren notwendig. Die Anlage könnte dadurch selbstregelnd auf einen maximalen Leistungsoutput oder Wirkungsgrad eingestellt werden.

Die letzten Modifikationen, die hier erwähnt werden, sind eher kosmetischer Natur und beeinflussen die Funktion der Anlage nicht.

In der Software könnte die Hintergrundfarbe des HAW-Logos angepasst werden. Alternativ könnte auch die Farbgebung der App an das Logo angepasst werden. Weiterhin wird momentan während des Betriebs mit jedem Messwertschleifendurchlauf die manuelle Skalierung des Hauptgraphen durch die automatische Skalierung überschrieben. Um Verwirrung bei den Anwendern zu vermeiden, wäre es sinnvoll dies zu umgehen.

An der Anlage selbst könnte eine Beschilderung der einzelnen Bauteile eine Orientierung erleichtern und dem Anwender schneller ermöglichen, die Bezeichnungen aus der Anleitung (vgl. Anhang 18: Bedienungsanleitung Pumpspeichermodell) zuzuordnen.

Um den Laptop mit der Steuersoftware der Anlage jederzeit an der Anlage aufbauen zu können, wäre ein ausklappbares Pult oder eine einfache Holzplatte sinnvoll. Diese könnte zum Beispiel unterhalb der oberen Ebene am Holz und an den metallenen Unterzügen angebracht werden. Zur Aufbewahrung des Laptops ist neben dem unteren Speicherbecken ausreichend Platz vorhanden.

Das in Kapitel 7.4 erwähnte Auswerteskript könnte durch eine grafische Komponente erweitert werden. Dazu könnte die Plot-Funktion aus der App adaptiert werden.

Anhangsverzeichnis

- Anhang 1: Berechnung des Behältervolumens
- Anhang 2: Berechnung der Behälterfüße nach AD2000-Merkblatt S 3/2
- Anhang 3: Fertigungszeichnung des Behälters
- Anhang 4: Betriebsanleitung Druckspeicherbehälter
- Anhang 5: Dokumentation Druckspeicherbehälter (.zip)
- Anhang 6: Quellcode der App
- Anhang 7: Weitere Pumpspeicherkonzepte
- Anhang 8: Code-Beispiele LabJack
- Anhang 9: Installationspaket der MATLAB-App
- Anhang 10: Bedienungsanleitung VOLT-CRAFT-Netzteil
- Anhang 11: R&I der umgebauten Anlage (Originalgröße)
- Anhang 12: Datenblatt Füllstandsensor
- Anhang 13: Datenblatt Stromsensor
- Anhang 14: Poster
- Anhang 15: Vermessung der Turbine
- Anhang 16: Baumusterprüfzertifikat SV 8-10_11_2020_LA_I (Sicherheitsventil)
- Anhang 17: Ergänzende Hinweise
- Anhang 18: Bedienungsanleitung Pumpspeichermodell
- Anhang 19: Programmierhinweis für CB37 (E-Mail-Antwort Firma LabJack)
- Anhang 20: Messwerte der Anlagentests
- Anhang 21: Mail Bühler Technologies (Fragen zum Füllstandsensor)
- Anhang 22: Datenblätter und Unterlagen zu Hardwarekomponenten

Quellenverzeichnis

Literaturquellen

- [1] Degenhart, Heinrich; Schomerus, Thomas; Schulz, Detlef (Hrsg.): Pumpspeicher an Bundeswasserstraßen: Technische, wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen am Beispiel des Elbe-Seitenkanals. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [2] Heimerl, Stephan (Hrsg.): Wasserkraftprojekte Band II: Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift WasserWirtschaft. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [3] Zapf, Martin: Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem: Rahmenbedingungen, Bedarf und Einsatzmöglichkeiten. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [4] Conrad, Jochen; Pellingner, Christoph; Hinterstocker, Michael: Gutachten zur Renatibilität von Pumpspeicherkraftwerken. München: Bayrisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, 2014.
- [5] Popp, Matthias: Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [6] Giesecke, Jürgen; Heimerl, Stephan; Mosonyi, Emil: Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb. 6. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [7] Zacher, Serge; Manfred, Reuter: Regelungstechnik für Ingenieure: Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen. 15. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [8] Verband der TÜV e.V. (Hrsg.): AD 2000 Regelwerk. 11. Auflage. Berlin/Wien/Zürich: Beuth Verlag, 2018.
- [9] Conrad Electronic SE: Voltcraft, Labor-Netzgerät, Bedienungsanleitung. Conrad Electronic SE, 2016. (Anhang 10)

Internetquellen

- [10] <https://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/baufolit.jsp?s=Pumpspeicherkraftwerk> (abgerufen am 10.12.2018)
- [11] <https://www.ksb.com/kreiselpumpenlexikon/anlagenkennlinie/186932/> (abgerufen am 18.12.2018)
- [12] https://www.youtube.com/watch?v=1w2RP0Uy_KE (abgerufen am 02.01.2019)
- [13] <https://www.youtube.com/watch?v=gsB2nYyAAQw> (abgerufen am 03.01.2019)
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=uk2Cn-v3JEA> (abgerufen am 03.01.2019)
- [15] <http://www.powertower.eu/index.html> (abgerufen am 14.01.2019)
- [16] https://www.energy-charts.de/energy_pie_de.htm?year=2018 (abgerufen am 14.01.2019)
- [17] <https://www.youtube.com/watch?v=pnomwGCBNAE> (abgerufen am 14.01.2019)
- [18] <http://www.buoyant-energy.com/motivation.html> (abgerufen am 16.01.2019)
- [19] <http://www.gravitypower.net/> (abgerufen am 16.01.2019)
- [20] <https://forschung-energiespeicher.info/> (abgerufen am 17.01.2019)
- [21] „Betonkugeln im Bodensee sollen Windstrom speichern, unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/betonkugeln-im-bodensee-windstrom-speichern/> (abgerufen am 17.01.2019)
- [22] „Der Naturstromspeicher, Wir speichern Strom mit Wasser“. Naturspeicher GmbH, unter: <https://www.naturspeicher.de/de/naturstromspeicher.php> (abgerufen am 17.01.2019)
- [23] https://de.wikipedia.org/wiki/Naturstromspeicher_Gaildorf (abgerufen am 17.01.2019)
- [24] Popp, Matthias: Speicher für sicheren Strom aus Wind und Sonne, in: Energiewirtschaftliche tagesfragen 61. Jg. (2011), Heft 12, unter <http://www.ringwallspeicher.de/> (abgerufen am 17.01.2019)
- [25] Popp, Matthias: Regenerativstrom im Ringwall speichern, in: BWK Bd. 62 (2012), Nr. 12. unter <http://www.ringwallspeicher.de/> (abgerufen am 17.01.2019)
- [26] „Füllstandmesstechnik in der Prozesstechnik: Kontinuierliche Füllstandmessung in Flüssigkeiten (medienberührend)“, unter: <http://www.chemie.de/whitepaper/126345/ueuellstandmesstechnik-in-der-prozesstechnik.html> (abgerufen am 18.03.2019)

- [27] „Kategoriebestimmung und Konformitätsbewertung für verschiedene Druckgerätearten“, unter <http://www.druckgeraete-online.de/seiten/kategor1.htm> (abgerufen am 28.03.2019)
- [28] „Was ist ein Smart Grid?“ unter <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-ist-ein-smart-grid> (abgerufen am 03.05.2019)
- [29] <https://heindl-energy.com/>
- [30] <https://labjack.com/support/datasheets/u6>
- [31] <https://labjack.com/products/u6>
- [32] <http://www.druckgeraete-online.de/seiten/frameset1.htm>
- [33] <https://www.tuev-nord.de/de/>
- [34] <https://www.gsi-slv.de/>

Verwendete Normen

- [35] DIN 28011:2012-06, Gewölbte Böden- Klöpferform (DIN 28011:1993)
- [36] DIN 28081-2:2015-06, Apparatfüße – Teil 1: Apparatfüße aus Rohr (DIN 28081-1:2003 und DIN 28081-3:1985)
- [37] DIN 28081-2:2015-06, Apparatfüße – Teil 2: Apparatfüße aus Profilstahl (DIN28081-2:1988 und DIN 28081-4:1988)
- [38] DIN 28020:2007-07, Liegende Druckbehälter 0,63m³ bis 25 m³ - Maße (DIN28020:1998)

Sonstige Quellen

- [39] Neuwieser, Ferdinand; Marchner, Hans: Die Module der Druckgeräte-Richtlinie. Ein neues Prüfkonzept für die Herstellung von Druckgeräten. München, 1997.
- [40] Vinnemeier, Franz: Strömungsmaschinen-Vorlesungsskript. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015.
- [41] Kanitz, Rouven: Bachelorarbeit: Konstruktion eines Funktionsmodells eines Windenergieanlagentriebstranges zur Implementierung in ein Smart Grid. Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Technik und Informatik, Department Maschinenbau und Produktion, Institut für Antriebs- und Regelungstechnik, 2018.
- [42] Fielenbach, Frank: Vortrag: BetrSichV Druckgeräte/ Rohrleitungen gültig ab 01.06.2015. TÜV Rheinland, 2015.
- [43] Aufleger, Markus: Vortrag: Powertower. München: Bayrischer Energiedialog, Arbeitsgruppe „Beitrag der Speichertechnologien“ 3. Sitzung, 2015.
- [44] Heindl, Eduard: Vortrag: Der Lageenergiespeicher: Ein Konzept zur kostengünstigen Speicherung großer Mengen elektrischer Energie. Hochschule Furtwangen. (ohne Jahr)
- [45] Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt (Neufassung). Brüssel, 2014.
- [46] Klar, Robert; Aufleger, Markus; Thene, Mara: Buoyant Energy: Decentralized offshore energy storage in the european power plant park. University of Innsbruck, Unit of Hydraulic Engineering. (ohne Jahr)
- [47] Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU (Druckgeräterichtlinie 97/23/EG), 2014.
- [48] Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV), 2015.