

# Lastmanagement für eine Low-Tech Kleinwasserkraftanlage für Entwicklungsländer

**Fallbeispiel Nepal** 

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades Master of Science an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München.

Betreut von	Dipl. Phys. Stephan Baur		
	M.Sc. Franz Christange		
	Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher		
	Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme		
Eingereicht von	Andre Klöckner		
	Zugspitzstraße 16		
	85586 Poing		
	+49 160 990 284 53		

## Kurzzusammenfassung

In dieser Masterarbeit wird basierend auf herausgearbeiteten und vorhandenen Grundlagen vorausgegangener Arbeiten ein Low-Tech Lastmanagement für Kleinwasserkraftanlagen (insbesondere Wasserräder) entwickelt und praktisch im Labor aufgebaut und getestet. Besondere Herausforderungen hierbei sind der Einsatz für Entwicklungsländer und damit einhergehend ein möglichst robustes System, welches geringe Investitionskosten haben soll. Der Leistungsbereich, der in dieser Arbeit betrachtet wird, ist zudem mit bis zu 200 W im unteren Bereich angesetzt.

Für das Lastmanagement wird eine Elektronische Last Steuerung (englisch: Electronic Load Controller (ELC)) entwickelt und gebaut, welche ohmsche Lasten automatisiert zu- oder abschaltet, wodurch die Spannung des Selbsterregten Asynchrongenerators in einem definierten Bereich gehalten werden kann. Die Verwendung dieses Generatortyps ist dabei vorgegeben, da diese Wahl bereits in vorherigen Untersuchungen getroffen wurde. Um einen optimalen Betriebspunkt für den Asynchrongenerator zu finden, sollen hierzu zunächst Messungen und eine Wirkungsgradbestimmung durchgeführt werden.

Um das Gesamtsystem besser für den Nutzer auszulegen, werden zudem zwei verschiedene Versorgungs-Varianten betrachtet. Dies ist zum einen eine dreiphasige Variante A mit Strangspannungen von 230 V AC und zum anderen eine Variante B mit einer Ausgangsspannung von 12 V DC. Es werden praktische Tests und Messungen mit diesen Varianten und dem entwickelten Controller im Labor durchgeführt. Am Ende folgt eine Bewertung nach ausgewählten Kriterien und es werden Möglichkeiten für Erweiterungen und Weiterentwicklungen diskutiert.

**Stichworte:** Lastmanagement, Low-Tech, Kleinwasserkraft, Wasserrad, Inselsystem, Electronic Load Controller, Asynchrongenerator, SEIG, Entwicklungsländer, Nepal, Spannungshaltung, Frequenzhaltung, Wirkungsgrad

## Abstract

In this master thesis, a low-tech load management for small hydropower plants (especially water wheels) will be developed, practically built up and tested in the laboratory. The basis for that are worked out in the beginning and rely on existing foundations of previous work. Particular challenges are the use for developing countries and, as a result, the most robust system possible, which should also have low investment costs. The performance range considered in this work is set to 200 W which is low compared to similar systems.

For the load management an electronic load controller (ELC) is developed and built, which automatically switches resistive loads on and off, whereby the voltage of a self-excited asynchronous generator can be kept within a defined range. The use of this type of generator is given as this choice has already been made in previous examinations. In order to find an optimal operating point for the asynchronous generator, measurements and an efficiency determination should first be carried out for this purpose.

In order to better interpret the overall system for the user, two different supply variants are also considered. On the one hand this is a three-phase variant A with phase voltages of  $230 \vee$  AC and on the other hand a variant B with an output voltage of  $12 \vee$  DC. Practical tests and measurements with these variants and the developed controller are carried out in the laboratory. At the end, an evaluation follows and selected criteria and possibilities for extensions and further developments are discussed.

**Keywords:** load management, low-tech, small hydropower, water wheel, island system, electronic load controller, asynchronous generator, SEIG, developing countries, Nepal, voltage stability, frequency stability, efficiency

## Rechtserklärung

Hiermit erkläre ich,

Nachname: Klöckner Vorname: Andre

dass ich die beiliegende Masterthesis zum Thema:

Lastmanagement für eine Low-Tech Kleinwasserkraftanlage für Entwicklungsländer -Fallbeispiel Nepal

selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, sowie alle wörtlichen und sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet und die entsprechende Quelle angegeben habe.

Ich bestätige, die "TUM Richtlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und für den Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten an der Technischen Universität München, 2015", wie sie auf der Internetseite der Stabsstelle Chancengleichheit nachzulesen sind, anzuerkennen.

Vom Lehrstuhl und seinen Mitarbeitern zur Verfügung gestellte Hilfsmittel, wie Modelle oder Programme, sind ebenfalls angegeben. Diese Hilfsmittel sind Eigentum des Lehrstuhls bzw. des jeweiligen Mitarbeiters. Ich werde sie nicht über die vorliegende Arbeit hinaus weiter verwenden oder an Dritte weitergeben.

Einer weiteren Nutzung dieser Arbeit und deren Ergebnisse (auch Programme und Methoden) zu Zwecken der Forschung und Lehre, stimme ich zu.

Ich habe diese Arbeit noch nicht zum Erwerb eines anderen Leistungsnachweises eingereicht.

München, 19. September 2018 \_\_\_\_

# Aufgabenstellung

### Hintergrund der Themenstellung

In den abgelegenen Regionen Nepals leben zahlreiche Familien ohne elektrische Energieversorgung. Auf Grund des hohen Wasserkraftpotenzials könnten Kleinwasserkraftanlagen die Situation verbessern. Für diese Anlagen bietet sich ein Asynchronmotor als Generator an, da er kostengünstig, robust und verfügbar ist. Mit Hilfe einer Kondensatorbatterie kann der Asynchronmotor auch als Generator für ein Inselsystem eingesetzt werden. Durch Umfragen, Messungen und Simulationen wurde analysiert, welche elektrische Verbraucher bei Familien in abgelegenen Regionen Nepals zum Einsatz kommen, wie viel Energie benötigt wird und mit welchen Lastprofilen zu rechnen ist. Ausgehend von der bekannten Energiebereitstellung und Energienachfrage stellt sich die Frage, wie ein einfaches, kostengünstiges und realistisch umsetzbares Lastmanagement aussehen könnte. Ein mögliches Lastmanagement wird im Rahmen dieser Arbeit entwickelt, aufgebaut und im Labor getestet.

### Zielsetzung und Arbeitsschritte

Im Rahmen dieser praxisorientierten Arbeit sollen zunächst die Vorteile und Herausforderungen bei dem Einsatz eines Asynchronmotors im Inselbetrieb erfasst werden. Messungen von bereits durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten sollen zusammengefasst und bei Bedarf neue Messungen (Wirkungsgradbestimmung mit Drehmomentmuffe, Einsatz von Spulen zur Spannungsstabilisierung, Betrieb mit einer Phase) durchgeführt werden. Durch diese Vorarbeit soll festgestellt werden, ob und in welcher Form ein Lastmanagement sinnvoll bzw. notwendig ist. Anschließend sollen verschiedene Strategien für ein Lastmanagement für die gegebene Situation durchdacht werden. Nach einer Analyse der Strategien soll eine Auswahl von Strategien im Labor aufgebaut und intensiv getestet und vermessen werden. Anschließend soll eine Bewertung der Strategien nach folgenden Kriterien durchgeführt werden: Investitionskosten, Alltagstauglichkeit, Wirkungsgrad, Umsetzbarkeit, Lebensdauer, usw.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung				
Abstra	act	iii		
Aufga	Aufgabenstellung			
Inhalt	sverzeichnis	х		
Abbilo	dungsverzeichnis	xii		
Tabel	lenverzeichnis	xiii		
Abküı	zungen	xv		
Notat	ionen	xvii		
1	Einleitung	1		
1.1	Motivation	1		
1.2	Hintergrund	1		
2	Vorgehensweise	5		
3	Grundlagen	7		
3.1	Veranschaulichung des Gesamtsystems Wasserrad - Generator - Haushalt	7		
3.2	Der selbsterregte Asynchrongenerator im Inselbetrieb	7		
3.2.1	Arbeitsweise und Bestimmung der Kapazitäten	8		
3.2.2	Einphasige Belastung	10		
3.2.3	Verwendete Maschinen	11		
3.3	Definition Lastmanagement und Electronic Load Controller	14		
4	Auslegung des Systems - Generator bis Verbraucher	15		
4.1	Ergänzende Messungen und Ergebnisse am Asynchrongenerator	15		
4.1.1	Wirkungsgradbestimmung	15		
4.1.2	Aufbau zur Messung von Drehmoment und Drehzahl	16		
4.1.3	Messung von Drehmoment, Drehzahl, Strangspannung und Strangstrom	17		
4.1.4	Diskussion und Vergleich der Ergebnisse	22		
4.2	Spannungshaltung am Selbsterregten Asynchrongenerator	23		
4.2.1	Schalten von ohmschen Widerständen	23		
4.2.2	Drehzahlanpassung	23		
4.2.3	Schalten von Kondensatoren	24		
4.2.4	Schalten von Drosseln	24		
4.2.5	Zusammenfassung und Übersicht der Lösungsvarianten	26		
4.3	Das Lastmanagement	27		
4.3.1	Die Lasten und Verwendung der Lastwiderstände	28		
4.4	Electronic Load Controller	33		
4.4.1	Relaisschaltung	33		
4.4.2	Transformator und Gleichrichterschaltung	34		
4.4.3	Auswahl des Control-Boards	34		
4.4.4	Zukünftige Entwicklungen der Hardware	35		
4.4.5	Programmierung des Controllers	35		

5	Systemvarianten	41
5.1	Variante A	41
5.1.1	Testen des Systems mit Variante A	42
5.1.2	Messung der Strangspannungen während des Testzyklus	45
5.1.3	Anmerkungen zum Messverfahren	46
5.1.4	Auswertung der Messungen von Strangspannung, Frequenz und THD	46
5.1.5	Regelungstechnisches Verhalten des Testsystems mit Electronic Load Controller	
	(ELC)	50
5.1.6	Instabiles Verhalten mit ELC	51
5.1.7	Bezug zu Regularien in Nepal	52
5.1.8	Ergänzende Erkenntnisse zum Testzyklus	54
5.2	Variante A ohne ELC	54
5.2.1	Auswertung der Messungen von Strangspannung, Frequenz und THD	54
5.2.2	Zusammenfassung und direkter Vergleich - System mit und ohne ELC	56
5.3	Variante B	58
5.3.1	Die verwendeten Schaltnetzteile	58
5.3.2	Testen des Systems mit Variante B	61
5.3.3	Auswertung der Messungen von Strangspannung, Frequenz und THD	62
6	Mögliche Erweiterungen der Varianten A und B	67
7	Investitionskosten	69
7.1	ELC	69
7.2	Kondensatorbox	69
7.3	Zusatzkosten System-Variante B	71
7.4	Gesamtkosten des Systems und der Varianten A und B	72
7.4.1	Energiepreise	73
8	Bewertung, Zusammenfassung und Ausblick	75
8.1	Bewertung des Systems und der Varianten A und B	75
8.2	Abschließende Zusammenfassung	76
8.3	Zukunftsplanung, weiteres Vorgehen	77
Anha	ng	cxiii
А	Anhang	xiii
A.1	Stromlaufplan	cxiii
A.2	Einfache Methode zur Approximierung der Mindestkapazitäten	xxiii
A.3	Datenblatt Drehmomentsensor	xxvi
A.4	Belegung Sensorleitung des Drehmomentsensors	xli
A.5	Messergebnisse Wirkungsgradbestimmung	xliii
A.6	Wassererwärmung durch Lastwiderstände	dvii
A.7	Arduino-Code des Controllers	xlix

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Systemübersicht vom Wasserrad bis zum Haushalt	8
Abbildung 2	Ersatzschaltbild des dreiphasigen Asynchrongenerators mit R-L Last	
	nach [16] und [15]	10
Abbildung 3	Maschine A mit Typenschild	11
Abbildung 4	Maschine B mit Typenschild	12
Abbildung 5	Maschine C mit Typenschild	12
Abbildung 6	Verwendeter Drehmomentsensor zur Messung von Drehmoment und	
	Drehzahl	16
Abbildung 7	Sensorbox mit Laborbuchsen zum einfachen Anschluss von Messleitungen	17
Abbildung 8	Kondensatorbox für den dreiphasigen Anschluss von Lasten	18
Abbildung 9	Schiebewiderstand zur genauen Einstellung der Widerstandswerte	18
Abbildung 10	Wirkungsgrade der Asynchrongeneratoren A, B und C bei konstanter	
	Spannung	20
Abbildung 11	Wirkungsgrade der Asynchrongeneratoren A, B und C bei konstanter	
	Drehzahl	21
Abbildung 12	Spannungsfall durch ohmscher Last am self excited induction generator	
	(SEIG)	24
Abbildung 13	Spannungsanpassung durch Drehzahlvariation am SEIG	25
Abbildung 14	Spannungsanpassung durch zusätzliche Kondensatoren am SEIG	25
Abbildung 15	Spannungsanpassung durch Drosseln am SEIG	26
Abbildung 16	Lastwiderstände in Schrumpfschläuchen (links) und Edelstahlgefäß mit	
	versenktem Lastwiderstand	30
Abbildung 17	Wassertemperaturentwicklung von $V = 1$ I mit verschiedenen Lastwider-	
	ständen	32
Abbildung 18	Lastwiderstände auf Stahlgestell	32
Abbildung 19	Foto vom Testaufbau des Electronic Load Controllers	33
Abbildung 20	Regressionsfunktion für Phase L1 zur Bestimmung der Strangspannung	37
Abbildung 21	Testaufbau des gesamten Systems im Labor	41
Abbildung 22	Einphasige Prinzip-Skizze von Variante A	42
Abbildung 23	Lastdiagramm eines Haushaltes in Nepal, aus [7]	43

Abbildung 24	Lastdiagramm einer Schule in Nepal, aus [7] 43
Abbildung 25	Lastdiagramm des Testzyklus für Variante A 45
Abbildung 26	Gemessene Strangspannungen der Variante A mit ELC 47
Abbildung 27	Gemessene Frequenz und THDr der Variante A mit ELC 48
Abbildung 28	Strukturbild eines PT <sub>2</sub> -Gliedes 51
Abbildung 29	Schwingungsverhalten der Strangspannung bei instabilem Verhalten 53
Abbildung 30	Gemessene Strangspannungen der Variante A ohne ELC 55
Abbildung 31	Gemessene Frequenzen und THDr der Variante A ohne ELC 57
Abbildung 32	Einphasige Prinzip-Skizze von Variante B 58
Abbildung 33	Foto von einem der verwendeten Schaltnetzteile 60
Abbildung 34	Lastdiagramm des Testzyklus für Netzteile 12 V 61
Abbildung 35	Gemessene Strangspannungen der Variante B 64
Abbildung 36	Gemessene Frequenz und THDr der Variante B 65
Abbildung 37	Anteile der Oberschwingungen in Relation zur Grundschwingung bei Va-
	riante B 66
Abbildung 38	Investitionskosten für einen ELC 70
Abbildung 39	Investitionskosten für eine Kondensatorbox
Abbildung 40	Typenschild der Maschine, welche als Asynchrongenerator verwendet wirdxxxv

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Verwendete Asynchronmaschinen	13
Tabelle 2	Übersicht Lösungsvarianten zur Spannungshaltung	27
Tabelle 3	Schaltkonfiguration der drei Lastwiderstände	29
Tabelle 4	Schaltreihenfolge für den Testzyklus Variante A	44
Tabelle 5	Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Strangspannungen	46
Tabelle 6	Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Frequenz	46
Tabelle 7	Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Strangspannungen	56
Tabelle 8	Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Frequenz	56
Tabelle 9	Spannungen am Schaltnetzteil im Leerlauf	59
Tabelle 10	Spannungen am Schaltnetzteil mit 72 W-Last	59
Tabelle 11	Schaltreihenfolge der Verbraucher für Test der Variante B	62
Tabelle 12	Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Strangspannungen	63
Tabelle 13	Extremwerte und Arithmetischer Mittelwert der Frequenz	63
Tabelle 14	Zusatzkosten und Paketkosten für System Variante B	72
Tabelle 15	Gesamtkosten Variante A	73
Tabelle 16	Gesamtkosten Variante B	73
Tabelle 17	Stromkosten in \$/ kWh für verschieden Laufzeiten bis 50 Jahre	74
Tabelle 18	Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine A bei konstanter Spannung	xliii
Tabelle 19	Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine A bei konstanter Drehzahl	xliv
Tabelle 20	Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine B bei konstanter Spannung	xliv
Tabelle 21	Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine B bei konstanter Drehzahl	xlv
Tabelle 22	Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine C bei konstanter Spannung	xlv
Tabelle 23	Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine C bei konstanter Drehzahl	xlvi
Tabelle 24	Messergebnisse Erwärmung Wasser durch Lastwiderstände	xlvii

## Abkürzungen

- AC Alternating Current, dt. Wechselstrom
- DC Direct Current, dt. Gleichstrom
- DMM Digitales Multimeter
- ELC Electronic Load Controller
- KFZ Kraftfahrzeug
- LED Light Emitting Diode
- NPN negative-positve-negative
- PC Personal Computer
- RMS Root mean square, dt. Wurzel quadratisches Mittel
- SEIG self excited induction generator
- THD Total Harmonic Distortion, dt. "Gesamte harmonische Verzerrung"
- SPS Speicherprogrammierbare Steuerung
- TV Fernsehgerät

# Notationen

## Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung		
$c_p$	J/(kg K)	Spezifische Wärmekapazität		
C	F	Kapazität eines Kondensators		
D		Dämpfung		
E	J	Energie		
f	Hz	Frequenz der Selbsterregung		
Ι	А	Elektrischer Strom		
i	А	Elektrische Spannung, komplexe Größe		
K		Konstante/ Verstärkung		
$L_m$	Н	Magnetisierungs-Induktivität pro Phase		
$L_r$	Н	Rotorstreuinduktivität pro Phase		
$L_s$	Н	Statorstreuinduktivität pro Phase		
L	Н	Induktivität		
M	Nm	Drehmoment		
m	kg	Masse		
n	1/min	Drehzahl		
n	1/min	Rotorfrequenz		
P	W	Wirkleistung		
$Q_{Fl}$	l/s	Durchflussrate		
Q	var	Blindleistung		
$R_r$	Ω	Rotorwiderstand pro Phase, bezogen auf Stator		
$R_s$	Ω	Statorwiderstand pro Phase		
R	Ω	Widerstand		
S	VA	Scheinleistung		
s	1/s	Schlupf $s = \omega - \omega_r$		
T	K	Temperatur		
t	S	Zeit		
U	V	Elektrische Spannung		
u	V	Elektrische Spannung, komplexe Größe		
V	$m^3$	Volumen		
Z	Ω	Impedanz		

## Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\delta$		Realteil einer Variablen
$\eta$		Wirkungsgrad
$\lambda$	Wb	Flussverkettung
ω	$\frac{1}{s}$	Winkelgeschwindigkeit
$\omega_r$	$\frac{1}{s}$	Winkelgeschwindigkeit des Rotors
$\varphi$	0	Phasenwinkel

### Indizes

Symbol	Beschreibung
$\Delta$	Leiter-Leiter, Dreieck
μ <b>0</b>	Magnetisierung Leerlauf
$\mu$ L	Magnetisierung Last
0	Leerlauf
С	Kondensator
cycl	Zyklus
E	Eingeschwungen
е	Einschwingen
el	Elektrisch
G	Betriebspunkt Generator
in	Eingang
1	Load/ Last
L	Load/ Last
max	Maximal
mech	Mechanisch
Mess	Messung
min	Minimal
Ν	Nenn
Nt	Netzteil
out	Ausgang
rel	Relativ
St	Strang
v	Verzögerung

## 1. Einleitung

### 1.1. Motivation

Trotz eines nahezu kontinuierlichen Zuwachses der Elektrifizierungsraten weltweit, gibt es immer noch viele Regionen und Haushalte, die keinen Zugang zu elektrischem Strom besitzen. Insbesondere abgelegenere Regionen in Entwicklungsländern sind hiervon betroffen. Im Jahr 2016 hatten weltweit insgesamt nur 77,4% der Bevölkerung im ländlichen Raum Zugang zu Strom. Hierzu zählen unter anderem Gebiete wie Sub-Sahara Afrika mit 24,7% oder das südliche Asien mit 79,4%. [1] Die Hauptmotivation ist es, dazu beizutragen die genannte Raten mit möglichst einfachen, robusten und kostengünstigen Technologien weiter zu erhöhen. Neben simplen Anwendungen wie Beleuchtung in der Nacht oder genereller Verwendung elektrischer Geräte, welche den Menschen verwährt bleiben, kommt eine Korrelation zwischen Einkommen und Elektrifizierungsrate hinzu. Es kann angenommen werden, dass je niedriger das Einkommen in einer Region ist, desto weniger elektrifiziert ist sie - und umgekehrt. [2] So erreichen die nach UN-Definition am wenigsten entwickelten Länder eine Elektrifizierungsrate von lediglich 33,4% [1]

Dabei ist der Zugang zu bezahlbarer Energie einer der wichtigsten Katalysatoren für Entwicklung und trägt zur Reduzierung von Armut bei [3][4] Eine technisch robuste Lösung mit möglichst geringen Investitionskosten und laufenden Kosten, kann daher die Situation deutlich verbessern.

Ein Ansatz dies zu erzielen ist es, in Gebieten mit Zugang zu fließendem Gewässer, Wasserkraft mit Hilfe von Klein- und Kleinstwasserkraftanlagen nutzbar zu machen.

### 1.2. Hintergrund

Bereits seit einigen Jahren wird am Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme an der TU München der Einsatz von Wasserrädern in Nepal untersucht und praktisch getestet. Der Einsatz dieser seit Jahrhunderten bekannten Technologie und die einfache, robuste Bauweise bringen in Verbindung mit einem Generator elektrischen Strom in Haushalte in Nepal. Insbesondere die mechanische Konstruktion der Wasserräder und der Bau dieser vor Ort, mit Hilfe lokaler Metallverarbeiter, sind vollständig dokumentiert [5] und funktionieren bislang problemlos. Aus weiteren Erfahrungen und basierend auf vorangegangenen Arbeiten, fiel zudem die Wahl des Generators auf einen Selbsterregten Asynchrongenerator. Die elektrotechnische Auslegung eines Systems und damit einhergehend verschiedener Systemvarianten und Lastprofilen unterschiedlicher Verbraucher, sollen in dieser Thesis dokumentiert und praktisch mit Hilfe von Aufbauten und Messungen im Labor untersucht werden.

Wie bereits erwähnt, baut diese Thesis außerdem auf einigen anderen Arbeiten auf. Zur weiteren Einordnung werden im Folgenden die wichtigsten beschrieben, welche als Grundlage für alle weiteren Ausführungen in dieser Arbeit dienen:

**Geß, Lukas. Design of a low-tech water wheel for the electrical power supply in Nepal:** Semester Thesis aus dem Jahr 2017. Hier wird mit theoretischen Grundlagen der Bau eines einfachen oberschlächtigen Wasserrades aus Blech beschrieben, inklusive Bau eines Prototypen. [6]

Eisner, Johannes. A Low-Tech Water Wheel System for the Off-Grid Electricity Supply in Developing Countries by the Example of Nepal: Feasibility, Implementation & Evaluation:

Master's Thesis aus dem Jahr 2018. Hier wird die Umsetzung und Implementierung des Wasserrades vor Ort im Detail beschrieben. [5]

# Eisner, Johannes. Analysis of the Energy Demand for Designing Off-Grid Energy Systems for Developing Countries Based on the Example of Nepal:

Semester Thesis aus dem Jahr 2017. Hier werden unter anderem verschiedene Lastprofile von nepalesischen Haushalten aufgezeichnet und analysiert. [7]

### Klöckner, Andre. Weiterentwicklung eines Versuchsaufbaus mit neuen Untersuchungen in Theorie und Praxis für selbsterregte Asynchrongeneratoren im Inselbetrieb:

Forschungspraxis aus dem Jahr 2018. Hier werden mit Hilfe eines Versuchsaufbaus im Labor, praxisrelevante Untersuchungen am selbsterregten Asynchrongenerator im Inselbetrieb beschrieben. [8]

### Bottheim, Mathias. Eigenbau eines Datenloggers zur Analyse des Stromnetzes:

Forschungspraxis aus dem Jahr 2017. Dieser Bericht dient als Grundlage für die Spannungsmessung am selbsterregten Asynchrongenerator, wie es später in dieser Arbeit im Detail beschrieben wird. [9]

### Hench, Philipp. Wirkungsgrad einer Asynchronmaschine als Generator in Inselsystemen:

Bachelorarbeit aus dem Jahr 2017. Hier werden sowohl Grundlagen zum Betrieb als auch Untersuchungen mit verschiedenen Kondensatoren und Drehzahlen zur Bestimmung des Wirkungsgrades beschrieben. [10]

Die zwei erst genannten Arbeiten beschäftigen sich eher mit Herausforderungen im Bereich Maschinenbau. Dabei können die dort beschriebenen mechanischen Berechnungen und die Implementierung des Wasserrades in Nepal als abgeschlossen angesehen werden.

Die weiteren vier Arbeiten konzentrieren sich hauptsächlich auf Energie- und Elektrotechnik. Nachdem der SEIG im Inselbetrieb durch diese hinreichend untersucht wurde und auch bereits vor Ort im Einsatz ist, gilt es nun dieses System möglichst robust und kosteneffizient für den längerfristigen Einsatz zu optimieren. Hierzu ist es auch entscheidend den Bedarf elektrischer Leistung, ohne merkliche Spannungs- oder Leistungseinbrüche, auf Verbraucherseite und mit Hilfe der aufgezeichneten Lastprofile, zu decken.

## 2. Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird der Aufbau der Arbeit, die Ansätze und die Ziele, welche verfolgt werden, genauer erläutert. Da die vorliegende Arbeit zum größten Teil praktische Arbeiten und Aufbauten in Werkstatt und Labor beschreibt, soll hier eine allgemeine Einordnung und Übersicht der verschiedenen Arbeitsschritte und der herausgearbeiteten Grundlagen gegeben werden.

Nach einer kurzen Einleitung im vorherigen Kapitel, werden in Kapitel 3 ausgewählte Grundlagen erörtert, welche zum einen bereits bestehende Arbeiten ergänzen und zum anderen theoretische Grundlagen aufzeigen, welche zum Verständnis der später erfolgenden Auswertung der praktischen Arbeit dienen sollen. Dies Betrifft vor allem eine allgemeine Systemübersicht vom Wasserrad zum Verbraucher und Berechnungen und Beschreibungen rund um die Asynchronmaschine.

Im nächsten Schritt wird anhand der theoretischen Grundlagen, praktischer Erfahrungen, Vorgaben und ersten Messungen eine möglichst optimale Auslegung des Gesamtsystems angestrebt. Dabei werden zunächst die Einzelkomponenten genauer betrachtet, begründet warum diese ausgewählt wurden und erste Auslegungen und Messungen mit diesen durchgeführt.

Anschließend wird das System in zwei Varianten aufgeteilt, welche für die Praxis höchste Relevanz haben. Anhand vorhandener Daten werden für die Varianten Test-Lastprofile erstellt, mit denen die Situation in Nepal, möglichst in vollem Umfang und darüber hinaus im Labor nachgebildet werden. Das Zusammenspiel der Einzelkomponenten und den Verbrauchern wird beschrieben. Es werden unterschiedliche Messreihen erstellt, welche die Eigenschaften und dabei insbesondere die Spannungs- und Frequenzhaltung der verschiedenen Test-Lastprofile abbilden.

Hierauf folgt eine Analyse aller Investitionskosten, wobei zwischen den beiden Systemvarianten unterschieden wird. Zusätzlich werden für eine abschließende Bewertung die Energiekosten und Gesamtkosten des Systems näher betrachtet.

Den Abschluss der Untersuchungen bildet die Diskussion und Bewertung der Messergebnisse und die damit verbundenen Auswirkungen für die Nutzer des Systems. Es werden Vorund Nachteile aufgezeigt und Empfehlungen für Implementierungen gegeben.

Am Ende der Arbeit wird auf Basis der Diskussionen und Schlussfolgerungen der Einzelkapitel eine Zusammenfassung mit Ausblick und Vorschlägen für die weitere Vorgehensweise gegeben.

Alle praktischen Arbeitsschritte, Messungen und Ergebnisse werden immer - je nach Situation teilweise abschnittsweise, teilweise auch zusammenhängend - mit der gleichen Herangehensweise bearbeitet. Diese ist:

- Allgemeine Beschreibung und Messaufbau
- Dokumentation und Beschreibung der (Mess-) Ergebnisse
- Analyse und Auswertung der (Mess-) Ergebnisse
- Diskussion und Schlussfolgerungen

Zum Schluss ein Hinweis zu Quellenangaben in Abbildungen: Sofern nicht expliziert erwähnt, sind die Abbildungen selbst erstellt. Daher wird aus optischen Gründen auf einzelne Bemerkungen wie "eigene Darstellung" o. ä. verzichtet.

## 3. Grundlagen

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind die mechanischen Arbeiten des Wasserrades abgeschlossen. In diesem Kapitel werden daher kurz die Grundlagen des Gesamtsystems, zum selbsterregten (oft auch als kondensatorerregt bezeichneten) Asynchrongenerator im Inselbetrieb (SEIG) und zur Problematik des Lastmanagementes erläutert.

## 3.1. Veranschaulichung des Gesamtsystems Wasserrad -Generator - Haushalt

Eine kleine Übersicht in Abbildung 1 soll die weitere Bearbeitung der Aufgaben veranschaulichen. Zunächst ist auf der linken Seite das bereits im Einsatz befindliche Wasserrad dargestellt. Dieses ist mittels eines Getriebes mit starrer Übersetzung mit einer dreiphasigen Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer verbunden. Sie ist in der Darstellung mit "Generator" bezeichnet. Mit Hilfe einer Kondensatorbank wird dann eine Spannung an den Klemmen der Maschine erzeugt. Sie operiert somit im generatorischen Betrieb und stellt dem/ den angeschlossenen Haushalt(en) eine elektrische Leistung zur Verfügung. Um Investitionskosten möglichst gering zu halten und insbesondere aufgrund der Verfügbarkeit, wurde sich für dieses weniger dynamische System entschieden. Das heißt auch, dass bei angenommener, konstanter Wasserzufuhr zum Wasserrad und damit konstantem Durchfluss  $Q_{Fl}$  keine Anpassungen an die Nachfrage der Verbraucher möglich ist. Ebenso kann nicht garantiert werden, dass der Generator an einem Betriebspunkt mit hoher Effizienz betrieben werden kann. In genannten vorangegangenen Arbeiten wurde unter anderem gezeigt, dass dies hohe thermische Belastungen im Generator, bedingt durch hohe (Blind-)ströme im Leerlauf und geringen Teillastbereichen führen kann. Eine Verkürzung der Lebensdauer der Asynchronmaschine kann somit nicht ausgeschlossen werden.

Hinzu kommen noch Erfahrungen und Messungen aus der Praxis, siehe hier auch Messergebnisse in Kapitel 4.1.4, die zeigen, dass auf nur einer Phase Spannungsschwankungen bis  $\pm 50$  V und mehr auftreten können. Dies kann nicht nur Verbraucher beschädigen oder zu Defekten führen, sondern auch zu unsymmetrischer Belastung des Generators.

Um all die beschriebenen Nachteile so weit wie möglich zu verhindern, soll ein Lastmanagement konzipiert werden.

### 3.2. Der selbsterregte Asynchrongenerator im Inselbetrieb

Die theoretischen Grundlagen zum Asynchrongenerator wurden unter anderem bereits in 1.1 erwähnten Arbeiten herausgearbeitet. Die folgenden Beschreibungen sollen somit als Er-



Abbildung 1 Systemübersicht vom Wasserrad bis zum Haushalt

gänzung bzw. Vervollständigung dieser dienen. Aus diesem Grund werden nur die für die Aufgabenstellung relevanten Grundlagen herausgearbeitet.

Das sind vor allem Vorteile der Asynchronmaschine, die Berechnung bzw. die Bestimmung der Mindestkapazität für die an die Maschine angeschlossenen Kapazitäten und die Bestimmung des Wirkungsgrades.

Alle verwendeten und beschriebenen Asynchronmaschinen sind handelsübliche Asynchronmotoren mit Kurzschlussläufer, welche als Generatoren eingesetzt werden. Sie werden in der Literatur auch oft als SEIG bezeichnet. Dabei gibt es zahlreiche Vorteile bei der Verwendung gegenüber anderen Generatortypen, vor allem:

- Geringere Investitionskosten
- Robustheit bei Kurzschluss und Überspannung
- Keine Wartung, da keine Bürsten/ Kohlen
- Weltweit hohe Verfügbarkeit

Auch wenn in den letzten Jahren, insbesondere im unteren Leistungsbereich, vermehrt permanenterregte Generatoren eingesetzt werden, fiel die Wahl bislang auf SEIGs, da diese noch immer eine deutlich höhere Verfügbarkeit und niedrigere Investitionskosten haben. Soll das System jedoch in Bezug auf den Gesamtwirkungsgrad optimiert werden, so kann es sinnvoll sein, andere Generatortypen einzusetzen. Für Entwicklungsländer - und insbesondere abgelegenere Regionen - sind die beiden erst genannten Punkte jedoch von wesentlich größerer Relevanz. Dies bedingt die Vorauswahl auf den SEIG.[11][12][13][14]

### 3.2.1. Arbeitsweise und Bestimmung der Kapazitäten

Um eine handelsübliche Asynchron-Kurzschlussläufer-Maschine als Generator verwenden zu können, muss diesem eine kapazitive Blindleistung zur Verfügung gestellt werden. Im Gegensatz zu einem Betrieb an einem größeren Verbundnetz wie beispielsweise im Europäischen Verbundnetz, kann diese im Inselbetrieb nicht von einem solchen Netz bereit gestellt werden. Stattdessen wird eine Kondensatorbatterie/ Kondensatorbank benötigt, um eine Kondensatorerregung (synonym verwendet zu "Selbsterregung") hervor zu rufen. Für verschiedene Leistungen eines Generators müssen auch verschieden große Kapazitäten verwendet werden, welche zwischen den Phasen des Generators verschaltet sind.

Um eine Spannung zu erzeugen, wird eine Restmagnetisierung im Generator benötigt. Ist dies nicht der Fall, können alternativ die Kondensatoren beispielsweise mit einer Batterie geladen werden, um die benötigte Spannung zur Selbstinduktion bereit zu stellen. Wie in Anhang A.1 im Stromlaufplan auf Seite 2 dargestellt, werden die Kondensatoren hierzu in Dreieck am Generator verschaltet. Die Kapazitäten aller drei Kondensatoren sind zudem gleich groß. Es gibt auch weitere Möglichkeiten zur Verschaltung, je nach Anwendungsfall, siehe Forschungspraxis Klöckner [8].

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten die Höhe der Kapazitäten zu bestimmen. Wegen der komplexen Dynamik einer selbsterregten Asynchronmaschine, ist es jedoch schwierig diese exakt mathematisch zu beschreiben. Für die genaue Auslegung der Kondensatorkapazität, bedeutet das, dass zunächst die Annahme getroffen wird, der Rotor drehe immer mit konstanter Geschwindigkeit.

Die nichtlineare Differentialgleichung, mit der allgemein die Selbsterregung der Maschine beschrieben werden kann lautet [15]:

$$\dot{X} = f(X, \lambda) \tag{3.1}$$

Dabei ist X der Vektor der Zustandsgrößen und  $\lambda$  ist der Vektor der Parameter, welche hier die Luftspalt-Flussverkettung ist. Da sich die Rotorgeschwindigkeit in dieser Betrachtung nicht ändern soll, kann man  $\dot{X} = 0$  setzen. Hieraus folgt

$$f(X,\lambda) = 0 \tag{3.2}$$

Mit diesem Ansatz und den in Abbildung 2 dargestellten Zusammenhängen der Spannungen und Flussverkettungen im Ersatzschaltbild der dreiphasigen, selbsterregten Asynchronmaschine mit R-L-Last, lässt sich eine Matrix der folgenden Form aufstellen:

$$\begin{bmatrix} p\lambda_{qds} \\ p\lambda_{qdr} \\ pv_{qds} \\ pv_{qds} \\ pi_{lqd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_s + j\omega & B_s & 1 & 0 \\ B_r & T_r + js & 0 & 0 \\ \frac{T_{ss}}{C} & -\frac{B_{ss}}{C} & j\omega & -\frac{1}{C} \\ 0 & 0 & 1/X_L & -\frac{R_L}{X_L} + j\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{qds} \\ \lambda_{qdr} \\ v_{qds} \\ v_{lqd} \end{bmatrix}$$
(3.3)

Mit:

$$T_s = -R_s X_{rr}/D, T_r = -R_r X_{ss}/D, T_{ss} = -X_{rr}/D$$
  
 $B_s = R_s X_{mu}/D, B_r = R_r X_{mu}/D, B_{ss} = -X_{mu}/D$   
 $D = X_{ss} X_{rr} - X_{mu}^2, X_{ss} = X_s + X_{mu}, \text{ und } X_{rr} = X_r + X_{mu}$   
 $X$  wird hier teilweise parallel zu der Induktivität  $L$  verwendet, hat jedoch die gleiche Bedeu-

tung. Dies resultiert noch aus den angegebenen Quellen. [16] und [15]

Löst man diese Gleichung, indem man die Determinante der 4 x 4 Matrix 0 setzt und Realund Imaginärteil trennt, so lässt sich die Kapazität *C* bestimmen. In Kumar [16] wird so beispielsweise ein matlab-Skript vorgestellt, welches diese Methode verwendet.



Abbildung 2 Ersatzschaltbild des dreiphasigen Asynchrongenerators mit R-L Last nach [16] und [15]

Da genannte Maschinengrößen oft nicht bekannt sind und teilweise nur durch Extramessungen bestimmt werden können, wurde bereits in der Forschungspraxis von Klöckner [8] eine einfache Berechnung für die Praxis genau beschrieben. Diese basiert nur auf den Angaben der Typenschilder der Maschinen und erfasst im Vergleich zur Methode zuvor keinerlei Dynamiken oder R-L Lasten. Dennoch hat sich in der Praxis gezeigt, dass für die hier untersuchten Maschinen diese Methode absolut ausreichend ist, um eine Mindestkapazität für die Kondensatoren zu bestimmen. Im Anhang A.2 ist die detaillierte Anleitung für die Praxis beschrieben. Zusammengefasst ergibt sich daraus für eine Dreieckschaltung der Kondensatoren an einer im Stern verschalteten Maschine:

$$C = \frac{I_{St} \cdot \sin(\varphi)}{6\pi f \cdot U_{\Delta}} \tag{3.4}$$

#### 3.2.2. Einphasige Belastung

Für den Fall einer einphasigen Belastung des dreiphasigen Asynchrongenerators, werden in verschiedenen Papern Vorschläge zu einer alternativen Verschaltung der Kondensatoren gegeben, siehe [17] [18] [19]. Ein Anwendungsfall ist beispielsweise die Versorgung eines einzelnen Haushaltes mit nur einer Phase, was den Verdrahtungsaufwand erheblich reduzieren würde (drei statt fünf Leitungen).

Die in den Papern beschriebene Variante mit C-2C-Konfiguration wurde praktisch aufgebaut und getestet. C-2C bedeutet, dass nur zwei Kondensatoren verwendet werden. Einer mit

der Kapazität C und einer mit der Kapazität 2C. Hierbei ist zu beachten, zwischen welche Phasen diese angeschlossen werden. An den Phasen, an denen die geringere Kapazität mit 1C angeschlossen ist, wird die Last angeschlossen. Jedoch konnten keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden. Mit den Maschinen B und C (siehe Kapitel 3.2.3 für Details genannter Maschinen) konnte eine Selbsterregung erzielt werden. Es entstanden sehr starke Vibrationen, welche mit Zuschalten von Last geringer wurden. Wegen der starken Vibrationen, welche durch sich eventuell lösende Bauteile o. ä. nicht nur eine erhebliche Gefahrenquelle im Labor darstellen, sondern auch die Maschine und den Versuchsaufbau beschädigen können, wurden keine weiteren Messungen durchgeführt. Mit Maschine A konnte auch mit sehr großen Kapazitäten, welche über das 10-fache der berechneten Kapazitäten aufwiesen, keine Selbsterregung erreicht werden. Hieraus lässt sich schließen, dass für die untersuchten Maschinen eine Anwendung in C-2C-Konfiguration nicht praktikabel ist. Es liegt die Vermutung nahe, dass diese Variante der Selbsterregung nur mit Maschinen größerer Leistung funktioniert. Bei den bislang gefundenen Angaben in Papern u. ä. werden ausschließlich Maschinen verwendet, welche ein Vielfaches (mindestens Faktor 5) der Leistung der hier verwendeten Maschinen haben. Daher könnte es möglich sein, dass Maschinen mit sehr geringen Leistungen nicht oder zumindest nicht gut für den beschriebenen einphasigen Betrieb geeignet sind.

### 3.2.3. Verwendete Maschinen

Die in der Arbeit näher betrachteten Maschinen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Fotos der Typenschilder befinden sich in den Abbildungen 3, 4 und 5. Im Folgenden wird, wie in der Tabelle angegeben, nur kurz von Maschine A bis C gesprochen. Dabei ist Maschine A bereits an einem Wasserrad in Nepal im Einsatz.



Abbildung 3 Maschine A mit Typenschild



Abbildung 4 Maschine B mit Typenschild



Abbildung 5 Maschine C mit Typenschild

	Maschine A	Maschine B	Maschine C
Hersteller	KEB	SEVA	Siemens
Тур	DM63G4	SEV-MS 802-6 B3	1 A7083-8AB10
Leistung/ kW	0,18	0,55	0,25
Spannung $\Delta$ /V	230	220-240	230
Spannung Y /V	400	380-420	400
Strom $\Delta$ /V	0,95	2,99-2,74	1,78
Strom Y /V	0,55	1,73-1,59	1,06
Nennfrequenz/ Hz	50	50/ 60	50/ 60
$\cos(\varphi)$	0,7	0,72	0,64
Nenndrehzahl/ 1/min	1380	900/ 1080	685

Tabelle 1 Verwendete Asynchronmaschinen

## 3.3. Definition Lastmanagement und Electronic Load Controller

In diesem Kapitel wird kurz definiert, was Lastmanagement ist und warum es in einem Inselsystem, wie dem hier betrachteten, verwendet werden sollte. Hinzu kommt eine Einführung zu Electronic Load Controllern und wie diese im Lastmanagement verwendet werden können.

Wird von Lastmanagement gesprochen, dann meist im Kontext größerer Netze und Verschiebung von Lasten oder Lastspitzen. Grundsätzlich ist Lastmanagement jedoch nichts anderes als die gezielte Steuerung von Lasten [20]. Diese gezielte Steuerung kann auch in einem Inselsystem erfolgen und wegen Lastspitzen, welche im Vergleich zur gesamt installierten Last relativ hoch sind, auch sehr sinnvoll sein. Insbesondere bei Systemen mit geringen Leistungen geht es jedoch beim Lastmanagement auch darum, die Spannungen und die Frequenz auf einem möglichst konstanten Niveau zu halten. Für kleinere Inselsysteme und speziell für Kleinwasserkraft, hat sich dabei die Verwendung von so genannten Electronic Load Controllern zum Steuern von Lasten als praktikabel erwiesen.

Nach Smith [21] wird in Chan und Lubitz [22] zwischen drei verschiedenen Varianten von ELC unterschieden. Dies sind:

- Phasenanschnittsteuerung (Ein einzelner Schalter, der einen kontinuierlichen Teil jeder halben Wellenlänge des Stroms in eine einzige Dump-Load umleitet)
- Binär gewichtete Lasten (Mehrere Lastwiderstände mit mehreren Schaltern)
- Markierungsverhältnis, engl. mark ratio (Ein Schalter, der viele diskontinuierliche Teile jeder Wellenlänge des Stromes in eine einzelne Dump-Load umleitet)

Speziell für den Selbsterregten Asynchrongenerator gibt es noch weitere Möglichkeiten, die im Grunde alle auf dem gleichen oder ähnlichen Prinzip wie die binär gewichteten Lasten beruhen. Diese werden genauer in Kapitel 4.2 diskutiert.

# Auslegung des Systems - Generator bis Verbraucher

In diesem Kapitel wird die Auswahl von Einzelkomponenten beschrieben und Messungen an diesen durchgeführt, um später eine möglichst optimale Auslegung des Systems vom Generator bis zum Verbraucher zu erreichen. Die Komponente, welche hier zunächst diskutiert wird ist der SEIG. Anschließend werden auch verschiedene Lasten, Lastwiderstände, der ELC und weitere Hardware untersucht.

## 4.1. Ergänzende Messungen und Ergebnisse am Asynchrongenerator

Um in der Praxis einen möglichst idealen Betriebspunkt für den selbsterregten Asynchrongenerator im Inselbetrieb zu finden, wird zunächst auf Messungen und Ergebnisse aus der Bachelor Arbeit von Hench [10] und der Forschungspraxis von Klöckner [8] zurück gegriffen. Anschließend werden diese mit Messungen verglichen, welche mit Hilfe eines Drehmomentsensors erfasst wurden. Dieser ist in Abbildung 6 zu sehen.

### 4.1.1. Wirkungsgradbestimmung

Der Wirkungsgrad wird aus dem Verhältnis von elektrischer zu mechanischer Leistung an der Welle bestimmt.

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mech}} \tag{4.1}$$

Die mechanische Leistung wird aus dem Produkt von  $2\pi$ , Drehmoment und Drehzahl berechnet:

$$P_{mech} = 2\pi \cdot M \cdot n \tag{4.2}$$

Drehmoment und Drehzahl selbst werden mit Hilfe eines Drehmomentsensors gemessen, welcher in 4.1.2 genauer beschrieben ist.

Die elektrische Wirkleistung wird aus dem Produkt von Spannung und Strom an den Verbraucher bestimmt.

$$P_{el} = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str} \tag{4.3}$$

Wichtig ist hier, dass der Strom zur Wirkungsgradbestimmung nicht zwischen den Klemmen der Maschine und den Kondensatoren gemessen wird, da sich hier ein Teil des Stromes noch auf die Kondensatoren aufteilt, welcher den Verbrauchern nicht zur Verfügung steht und hier auch nicht zu einer Wirkleistung beitragen kann.

### 4.1.2. Aufbau zur Messung von Drehmoment und Drehzahl

Der zur Drehzahl- und Drehmomentmessung verwendete Sensor ist in Abbildung 6 zu sehen. Er ist direkt mit der Welle der Antriebsmaschine und dem Generator verbunden. Die Antriebsmaschine links im Bild dient hier der Simulation des Wasserrades. Das Datenblatt des Sensors ist in Anhang A.3.

Der Sensor liefert elektrische Signale zur Messung über eine 15-polige Sensorleitung. Zur Vereinfachung und zum öfteren Gebrauch von Messleitungen mit Laborstecker wurden die zur Verwendung nötigen Einzeladern auf Laborbuchsen in eine Sensor Box, zu sehen in Abbildung 7, aufgelegt. Die Farbe der Adern entspricht dabei denen der Buchsen der Box. Die Beschriftung erleichtert zudem den Anschluss an Labornetzteil und Multimeter. Zur Einsicht der vollständigen Belegung der Sensorleitung ist ein Ausschnitt der Bedienungsanleitung in Anhang A.4 hinterlegt.

Alle folgenden Messungen erfolgen mit einer konstanten Versorgungsspannung von 12V, welche von einem Labornetzgerät bereitgestellt wird. Die Messung der Spannung und Frequenz erfolgen über ein **D**igitales **M**ulti**m**eter (DMM).



Abbildung 6 Verwendeter Drehmomentsensor zur Messung von Drehmoment und Drehzahl

Der Generator ist mit einer Kondensatorbox verbunden, welche die Kondensatoren wie im Schaltplan in Anhang A.1 dargestellt, beinhaltet. Die Box ist in Abbildung 8 zu sehen. Des Weiteren wird der Aufbau der Lastwiderstände, wie er in 4.3.1 beschrieben ist, verwendet. Hinzu kommen zur möglichst genauen Einstellung drei Schiebewiderstände, von denen je einer pro Phase angeschlossen ist. Sie können alle Widerstandswerte von 0  $\Omega$  bis 1000  $\Omega$


Abbildung 7 Sensorbox mit Laborbuchsen zum einfachen Anschluss von Messleitungen

annehmen. Ein solcher Schiebewiderstand ist in Abbildung 9 zu sehen.

# 4.1.3. Messung von Drehmoment, Drehzahl, Strangspannung und Strangstrom

Die Tabellen zeigen die Messergebnisse für die drei Maschinen A bis C für ausgewählte Kondensatorbänke. Nach der Berechnung der Kapazitäten nach den in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren, ist es wichtig eine Vergleichbarkeit herzustellen, indem die Strangspannungen und die Frequenz bei gleichen Bedingungen (relative Last und Drehzahl) zumindest ähnlich sind. Die verwendeten Kapazitäten sind:

- Maschine A: 3 μF
- Maschine B: 8μF
- Maschine C: 6 µF

Wie in der Bachelorarbeit von Hench [10] bereits festgestellt wird, hängt der Wirkungsgrad am Ende vor allem von Drehzahl n, Kapazität der Kondensatoren C und der Last Z ab. Aus diesem Grund ist es auch schwierig eine Drehzahl festzulegen, mit der wiederum - wie beschrieben - die Kapazitäten festgelegt werden. Hinzu kommt, dass alle Maschinen unterschiedliche Nenndrehzahlen  $n_N$  haben. Am Ende wird sich für eine möglichst praxisnahe Variante entschieden, bei der eine Drehzahl oberhalb der Nenndrehzahl des Generators



Abbildung 8 Kondensatorbox für den dreiphasigen Anschluss von Lasten



Abbildung 9 Schiebewiderstand zur genauen Einstellung der Widerstandswerte

festgelegt wird, da so mehr Leistung entnommen werden kann. Bereits in [10] wird mit unterschiedlichen Drehzahlen gemessen. Die besseren Ergebnisse werden mit  $n = 740 \frac{1}{\text{min}}$  erzielt bei einer Maschine mit  $n_N = 675 \frac{1}{\text{min}}$ . Mit dieser Grundlage wird in den folgenden Messungen die relative Drehzahl

$$n_{rel} = \frac{n}{n_N} \tag{4.4}$$

festgelegt. Mit den erwähnten Werten ergibt sich  $n_{rel} = 740/675 = 1,0963$ . Dies soll ein Daumenwert für die Einstellungen der anderen Maschinen sein.

Generell werden zwei unterschiedliche Messreihen erstellt:

- 1. Konstante Kapazität, Konstante Drehzahl
- 2. Konstante Kapazität, Konstante Spannung durch Drehzahlanpassung

Ziel der Konstanten Drehzahl ist es, diese Messergebnisse mit denen aus [10] zu vergleichen.

Ziel der Spannungshaltung ist es, herauszufinden, ob es einen besonders günstigen Betriebspunkt gibt, der unter Last eingestellt werden kann, sodass sich ein möglichst guter Wirkungsgrad für die Praxis ergibt. Auf diesen Bereich (unter Einbezug weiterer Faktoren, wie Frequenzwahrung in einem gewissen Bereich, keine Überlast, usw.), könnte im späteren Gesamtsystem der Antrieb (Wasserrad mit Getriebe) eingestellt werden

Relativ zur maximalen, elektrischen Leistung wird die Last jeweils in mindestens neun Schritten unterteilt, sodass im Abstand von ca. 10%-Punkten eine Wirkungsgrad-Übersicht erstellt werden kann. Im unteren Lastbereich von nur wenigen Watt können nicht immer Verbraucher oder Widerstände gefunden werden, welche die passenden Werte aufweisen. Aus diesem Grund werden immer neun, bei Maschine A und B noch zusätzlich eine zehnte leicht abweichende Messung durchgeführt. Folgende Größen sind in den Tabellen in Anhang A.5 dargestellt:

- <sup>Pel</sup>/<sub>W</sub>: Elektrische Leistung, welche theoretisch als Last angeschlossen wird. In (mindestens) neun (S0 bis S10 in Tabellen in Anhang A.5) Stufen abgestuft vom maximal erzielten Wert der Leistung, bei der die Spannung höchstens 10 V vom Nennwert von 230 Vabweicht
- $\frac{R_{230V}}{\Omega}$ : Theoretischer Wert des Strangwiderstandes bei  $U_{St}$ =230 V, berechnet aus den Schritten von  $P_{el}$ , d.h.  $R_{230V} = \frac{3U_{St,N}^2}{P_{el}} = \frac{3 \cdot (230 \text{ V})^2}{P_{el}}$
- <u>R<sub>Mess</sub></u>: Gemessener bzw. eingestellter Wert der Strangwiderstände. Mit den in 4.1.2 be- schriebenen Widerständen in Kombination mit den Schiebewiderständen lassen sich nicht alle Werte der Schritte einstellen. Daher kann es zu Abweichungen kommen, welche hier

dokumentiert sind. Teilweise werden auch einfache Glühlampen als Widerstände verwendet.

- <sup>USt,Mess</sup>: Gemessene Strangspannung des Asynchrongenerators. Da eine symmetrische Belastung vorliegt, gibt es nur vernachlässigbar kleine Abweichungen der Strangspannun-gen untereinander, weshalb hier mit einem Wert für alle drei Stränge gerechnet wird.
- <sup>I<sub>St,Mess</sub></sup>: Gemessener Strangstrom. Da eine symmetrische Belastung vorliegt, gibt es nur vernachlässigbar kleine Abweichungen der Strangströme untereinander, weshalb hier mit einem Wert für alle drei Stränge gerechnet wird.
- $\frac{n_{Mess}}{1/\min}$ : Mit Sensor gemessene Drehzahl an der Welle.
- $\frac{M_{Mess}}{Nm}$ : Mit Sensor gemessenes Drehmoment an der Welle.
- η: Wirkungsgrad, berechnet nach Formel 4.1

Graphisch dargestellt ergeben sich die zwei Diagramme in Abbildung 10 und 11. Es ist jeweils der Wirkungsgrad über die elektrische Leistung dargestellt.



Abbildung 10 Wirkungsgrade der Asynchrongeneratoren A, B und C bei konstanter Spannung



Abbildung 11 Wirkungsgrade der Asynchrongeneratoren A, B und C bei konstanter Drehzahl

# 4.1.4. Diskussion und Vergleich der Ergebnisse

Zunächst wird ersichtlich, dass der Wirkungsgrad mit zunehmender Last steigt. In oberen Leistungsbereichen ist der Unterschied im Wirkungsgrad deutlich geringer, als im unteren Bereich. Das heißt, wenn die Maschine nicht ganz unter Vollast arbeitet, sind die Verluste nur sehr gering.

Insbesondere bei den zusätzlichen Messungen im unteren Leistungsbereich wird deutlich, dass der Betrieb hier nicht wirtschaftlich sein kann. Es bleibt Leistung ungenutzt und der Wirkungsgrad fällt auf unter 20%.

Für die Praxis heißt das, dass die Maschine möglichst bei über 75% der maximalen Last betrieben werden sollte, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Hinzu kommt, dass nach Erkenntnissen aus [8] auch die thermische Belastung des Generators selbst in diesem Bereich am geringsten ist.

Des Weiteren kann mit einer Messung an der Maschine B gezeigt werden, dass in einem Bereich, in dem die Spannung unter Last bereits sehr stark eingebrochen ist, der Wirkungsgrad sehr stark gesteigert werden kann. Dies ist jedoch kein Betriebspunkt der für die Praxis relevant ist, da alle Verbraucher für 230 V ausgelegt sind. Bei Wirkungsgradangaben ist also zudem noch darauf zu achten, ob diese nah bei Nenndaten der Maschine (230 V, 50 Hz) erhoben werden oder aber in einem Bereich der praktisch keinen Sinn ergibt.

Weiterhin auffällig ist, dass die "Kurven" der Wirkungsgrade bei konstanter Spannung und bei konstanter Drehzahl nahezu kongruent sind, obwohl Ströme, Spannungen, Drehzahl und Drehmoment unterschiedlich sind.

Im Vergleich zu Bachelorarbeit von Hench [10] ist festzustellen, dass die Wirkungsgrade in ähnlichen Bereichen liegen und - sofern hier untersucht - die Punkte 1 bis 5 als auch das Fazit am Ende der Arbeit bestätigt werden können.

Zusammenfassend können folgende Punkte festgehalten werden:

- Der Wirkungsgrad steigt mit zunehmender ohmscher Last
- Der maximal erzielte Wirkungsgrad  $\eta$  liegt bei 68,1%
- Der maximale Wirkungsgrad  $\eta$  bei Spannungen über 220 V liegt bei 57,99%
- Die Ergebnisse unterstützen alle Annahmen, die in der Bachelorarbeit von Hench [10] getroffen werden
- Die durch einen Hebel und Waage errechneten Wirkungsgrade in der Bachelorarbeit [10] und der Masterarbeit von Eisner [5] können als Richtwerte dienen und liegen im Bereich der hier wesentlich genauer bestimmten Werte.
- Für die Praxis wäre es ideal den Generator immer nahe der Vollast zu betreiben

# 4.2. Spannungshaltung am Selbsterregten Asynchrongenerator

Das Problem des Spannungsfalls am Generator nach Zuschalten von Lasten wurde bereits in genannten Arbeiten beschrieben. Wird eine Last zugeschaltet, so sinkt die Spannung am Generator. Wie unter anderem auch aus den Wirkungsgrad-Tabellen in Anhang A.5 ersichtlich wird, kann es ohne Spannungsanpassung zu Abfällen von bis zu 100 V und mehr kommen. An dieser Stelle sollen daher vier Lösungsvorschläge diskutiert werden. Am Ende wird nach folgenden Kriterien entschieden, welcher der Ansätze weiter verfolgt wird:

- 1. Investitionskosten
- 2. Robustheit und Haltbarkeit
- 3. Zusätzliche Nutzbarkeit

#### 4.2.1. Schalten von ohmschen Widerständen

Der Blindstrombedarf des Generators wächst mit größer werdenden ohmschen Lasten. Dies ist graphisch in Abbildung 12 dargestellt. Es stellt sich ein Betriebspunkt ( $U_G|I_G$ ) ein, welcher sich von dem im Leerlauf unterscheidet. Dabei steigt der Blindstrombedarf um

$$I_{\mu L} = I_G - I_{\mu 0} \tag{4.5}$$

Die Spannung sinkt, bis diese Bedingung erfüllt ist.

So lange die Last konstant ist, bleibt folglich auch die Spannung konstant, da kein zusätzlicher Blindstrom benötigt wird und keine Verschiebung dieses Betriebspunktes stattfindet. Dieses Prinzip wird ausgenutzt, indem je nach Bedarf Lastwiderstände hinzu- oder abgeschaltet werden, sodass es einen geringen Betriebsbereich um einen gewünschten Betriebspunkt gibt. Dieser Betriebspunkt ist hier eine Strangspannung von 230 V.

Lastwiderstände sind vergleichsweise günstig. Für größere Leistungen (> 300 W) können gar handelsübliche Wasserkocher eingesetzt werden. Auch die Lastwiderstände können mit Hilfe eines wasserdichten Gehäuses Wasser erwärmen, um einen Mehrwert zu bieten.

#### 4.2.2. Drehzahlanpassung

Wie bereits in Kapitel 4.1.4 angewendet, kann durch eine Erhöhung der Drehzahl auch die Spannung am Generator erhöht werden. Hiermit ändert sich die Kennlinie des SEIG wie in Abbildung 13 dargestellt. Die neue, orange eingefärbte Kennlinie mit höherer Drehzahl schneidet die Kondensatorkennlinie bei einer höheren Spannung  $U'_0$ .

Was mit Hilfe eines Frequenzumrichters und einer Antriebsmaschine im Labor sehr einfach zu realisieren ist, gestaltet sich bei einem Wasserrad schwieriger. Hier müsste der Zufluss des Wassers  $Q_{Fl}$  je nach Last erhöht oder verringert werden. Um dies zu Automatisieren, werden meist teure Aktuatoren benötigt, die beispielsweise mit einem Schieber den Wasserzufluss steuern. Hinzu kommt eine bestimmte Trägheit, da eine bestimmte Menge Wasser



Abbildung 12 Spannungsfall durch ohmscher Last am SEIG

und damit Masse bewegt werden muss. Die Drehzahl kann so nicht beliebig schnell erhöht oder reduziert werden.

Eine andere Variante ist es, ein variables Getriebe einzusetzen, welches die Drehzahl automatisch anpasst. Diese Art von Getrieben sind jedoch teurer und fehleranfälliger als jene mit festem Übersetzungsverhältnis, welche bereits in Nepal etabliert sind. Ein zusätzlicher Nutzen ergibt sich weder mit der Kontrolle des Wasserzuflusses, noch durch ein variables Getriebe.

## 4.2.3. Schalten von Kondensatoren

Mit höheren Kapazitäten wird dem SEIG auch mehr Blindleistung zur Verfügung gestellt. Hieraus resultiert eine neue Kondensatorkennlinie. Sie ist in Abbildung 14 orange dargestellt. Durch den größeren Blindstrom schneidet die neue Kennlinie die Leerlaufkennlinie bei einem höheren Spannungswert  $U'_0$ .

Werden nun verschiedene Kapazitäten je nach Last am SEIG hinzu- oder abgeschaltet, lässt sich so die Spannung in einem engen Bereich um einen definierten Betriebspunkt halten. Der große Vorteil ist, dass Kondensatoren vergleichsweise günstig und robust sind. Ein zusätzlicher Nutzen durch die Kondensatoren kann jedoch nicht erreicht werden.

#### 4.2.4. Schalten von Drosseln

Mit Hilfe von Drosseln kann die Form der Kondensatorkennlinie verändert werden, sodass eine neue Kennlinie entsteht. Sie ist in Abbildung 15 orange dargestellt. Sie zeichnet sich durch den für Drosseln typischen Sättigungsknick aus. Die Drosseln werden parallel zu



Abbildung 13 Spannungsanpassung durch Drehzahlvariation am SEIG



Abbildung 14 Spannungsanpassung durch zusätzliche Kondensatoren am SEIG

den Kondensatoren verschaltet. Ein Vorteil der Drosselspulen ist, dass sie die Spannung in einem bestimmten Bereich halten. Sind die Drosseln also ideal ausgelegt, wird keine zusätzliche Regelung benötigt. Dennoch ist es möglich, dass der Spannungsbereich zu groß ist, weshalb weitere Drosseln zu- oder abgeschaltet werden müssten. Hinzu kommt, dass die Induktivität der für die Maschinen A bis C benötigten Drosseln im Bereich von µH liegen, wie in [8] approximiert wird. Spulen mit Eisenkern in dieser Größe sind kommerziell nicht überall erhältlich und teurer als beispielsweise Lastwiderstände oder Kondensatoren. Einen zusätzlichen Nutzen, außer der Begrenzung der Spannung auf einen bestimmten Bereich, bieten sie zudem nicht.



Abbildung 15 Spannungsanpassung durch Drosseln am SEIG

# 4.2.5. Zusammenfassung und Übersicht der Lösungsvarianten

In Tabelle 2 ist eine Übersicht gegeben, welche die vier Lösungsvarianten nach den drei genannten Kriterien bewertet.

Insbesondere auf Grund des Zusatznutzens der Lastwiderstände wird diese Variante in den nächsten Kapiteln weiter verfolgt. Da die Abwärme wegen der eher geringen Leistungen des eingesetzten Generators ebenfalls gering ausfällt, kommen Nutzen wie die Erwärmung eines Wohnraumes, ähnlich einer Elektroheizung, nicht in Frage. Stattdessen werden die Lastwiderstände mit Hilfe eines wasserdichten Gehäuses dazu verwendet, Wasser nach dem Prinzip eines Wasserkochers zu erwärmen. Detailliert wird dies in Kapitel 4.3.1 beschrieben. [11][14][23][24][25][26]

	Investitionskosten	Robustheit, Haltbarkeit	Zus. Nutzen
Drehzahlanpassung	Hoch	Mittel	Nein
Kondensatoren schalten	Niedrig	Hoch	Nein
Drosseln schalten	Mittel	Hoch	Nein
Widerstände schalten	Niedrig	Hoch	Abwärme

#### Tabelle 2 Übersicht Lösungsvarianten zur Spannungshaltung

# 4.3. Das Lastmanagement

In diesem Kapitel erfolgt die vollständige Auflösung der Fragezeichen-Box aus Abbildung 1. Hinter der Box verbirgt sich, wie bereits erwähnt, das Lastmanagement des Systems. Dieses besteht aus vielen einzelnen Komponenten, welche zusammen den ELC mit Lasten ergeben. Diese Komponenten sind:

- Schaltbare ohmsche Lastwiderstände
- C-Control Board (Arduino Uno) mit Atmega 328
- Relaisschaltung zum Schalten der Lastwiderstände
- Transformator (230 V -> 3 V)
- Gleichrichterschaltung mit Spannungsteiler zur Spannungserfassung am Analogeingang des Atmega 328

Gegenüber der Möglichkeit des manuellen Schaltens von ohmschen Lasten, wird vor allem das automatisierte Schalten bevorzugt. Auf diese Weise kann ein Plug and Play-System entwickelt werden, bei dem der Nutzer am Ende keine extra Schalter betätigen- oder sich mit Leistungsangaben von Beleuchtung auseinandersetzen muss.

Alle Varianten des Systems basieren auf der selben Grundidee. Es wird ein ELC entwickelt, welcher automatisiert Lasten zu- oder abschalten kann. Wenn die Spannung einen Wert über- oder unterschreitet, werden in der Folge Lastwiderstände ab- oder hinzu geschaltet. Auf diese Weise bleibt die gesamte Last und die Spannung selbst zu jeder Zeit in einem definierten Bereich.

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Komponenten aus obiger Liste genauer betrachtet und ausgelegt, indem beispielsweise Messungen durchgeführt werden.

#### 4.3.1. Die Lasten und Verwendung der Lastwiderstände

Um die überflüssige Energie zu nutzen und einen Mehrwert für die Verbraucher zu gewährleisten, werden ohmsche Lastwiderstände eingesetzt, welche später für die Erwärmung von Wasser dienen sollen.

In den nächsten beiden Abschnitten wird zunächst die Auswahl der Widerstände näher erläutert. Anschließend werden Messungen durchgeführt, um zu zeigen, dass das Wasser auf eine bestimmte Temperatur erwärmt werden kann, die auch in der Praxis einen Mehrwert bietet.

Die Widerstandswerte werden so ausgewählt, dass sich ungefähr eine Gleichverteilung von angelegter Leistung bei Schalten der Widerstände ergibt. Hierbei wird zunächst festgelegt, in wie vielen Stufen geschaltet werden soll. Die Anzahl an Schaltzuständen lässt sich wie folgt aus der Summe der Binomialkoeffizienten errechnen:

$$\sum_{k=0}^{n} \binom{n}{k} = \binom{n}{0} + \binom{n}{1} + \dots + \binom{n}{n} = 2^{n}$$
(4.6)

Daraus ergeben sich mit n = 3 Lastwiderständen insgesamt acht Stufen, welche durch die verschiedenen Möglichkeiten des Parallelschaltens erreicht werden können. Bei vier Widerständen wären es bereits 16 Stufen. Aus Kostengründen und Verringerung des Verdrahtungsaufwands, wird sich in dieser Arbeit für die Variante mit drei Widerständen entschieden. Es sollen acht Stufen sein, wobei die erste Stufe keine geschalteten Widerstände hat. Auf Grund der maximalen Leistung der Maschine A, werden pro Phase maximal  $P_{St,max} = 80$  W Leistung benötigt. Das entspricht ca. 120% der maximal gemessenen elektrischen Leistung dieser Maschine. Diese Überdimensionierung soll in der Praxis eventuell auftretende höhere Spannungen abfangen. Diese könnten zum Beispiel durch eine ungewollte Drehzahlerhöhung am Generator durch gesteigerten Wasserzufluss oder ähnlichem entstehen. Aus Erfahrungen aus Nepal wurde unter anderem berichtet, dass manchmal die Sicherungen wegen Überspannung auslösen. Dies soll hiermit verhindert werden.

Da insgesamt auch die Investitionskosten beachtet werden sollen, wird zudem festgelegt, dass der maximale Leistungswert eines Widerstandes 50 W nicht überschreiten soll, da dies eine kommerziell häufig erhältliche Größe ist, welche günstiger ist als die nächstgrößeren. Der größte Widerstand muss mit  $\frac{1}{7}$  von  $P_{St,max} = 80$  W berechnet werden.

Mit diesen Festlegungen lässt sich nun die theoretisch beste Verteilung berechnen:

$$R_1 = \frac{U_{St}^2}{\frac{1}{7}P_{St,max}}$$
(4.7)

$$R_2 \ge \frac{U_{St}^2}{50 \,\mathrm{W}} \tag{4.8}$$

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{\frac{U_{St}^2}{P_{St,max}}}$$
(4.9)

Mit  $P_{St,max} = 80$  W und  $U_{St} = 230$  V ergeben sich die Werte

- $R_1 = 4628,75 \,\Omega$
- $R_2 \ge 1058 \, \Omega$
- $R_3 \le 2848,46 \,\Omega$

Auf Grund von Verfügbarkeit und typisch verwendeten Widerstandswerten, wird sich für die Konfiguration  $R_1 = 4700 \Omega$ ,  $R_2 = 1200 \Omega$ ,  $R_3 = 2200 \Omega$ , wie in Tabelle 3 zu sehen, entschieden. Diese Werte sind nahe an den berechneten. Außerdem ist die siebenstufige Schaltung in dieser Übersicht mit angegeben.

$P_L$ / W	$R_L$ / k $\Omega$	Konfiguration
11,3	4,700	4,7
24,0	2,200	2,2
35,3	1,499	2,2    4,7
44,1	1,200	1,2
55,3	0,956	1,2    4,7
68,1	0,776	1,2    2,2
79,4	0,666	1,2    2,2    4,7

Tabelle 3 Schaltkonfiguration der drei Lastwiderstände

Im Folgenden wird angenommen, dass die komplette Leistung, welche in den Widerständen umgesetzt wird, als Heizleistung an die Umgebung abgegeben wird. Um einen Nutzen dieser Leistung zu erhalten werden wie folgt zunächst Approximationen und anschließend Messungen durchgeführt.

Für Luft ist eine Berechnung zu aufwendig und nicht sinnvoll. Ein Vergleich der Leistung der verwendeten Widerstände mit dem Heizwert von Holz, welches ein weit verbreiteter Energieträger zum Heizen in Entwicklungsländern ist, zeigt zusätzlich, dass dieser Ansatz unnötig ist. Der Heizwert von Holz liegt im Bereich von 4  $\frac{kWh}{kg}$  [27]. Um auf 4 kW h zu kommen, müsste der 72 W-Widerstand folglich über 55,5 h betrieben werden.

Anders sieht es bei einer geringeren Menge Wasser aus. Es wird angenommen, dass Wasser eine Spezifische Wärmekapazität  $c_p$  von 4185  $\frac{J}{kgK}$  bei 20 °C hat. [28] Es wird zudem angenommen, dass Masse m und Volumen V nach Temperaturänderung  $\Delta T$  konstant bleiben. Dies ist in der Realität nicht der Fall. Um zu zeigen, ob es sinnvoll ist Wasser mit den angegebenen Leistungen zu erwärmen, ist diese Annahme jedoch hinreichend und vereinfacht so die Rechnung. Mit dem aus der Thermodynamik bekannten Zusammenhang

$$\Delta E = m \cdot c_p \cdot \Delta T \tag{4.10}$$

und mit

$$\Delta E = \Delta P \cdot t \tag{4.11}$$

lässt sich die Temperaturerhöhung für eine bestimmte Zeit oder umgekehrt approximieren. Für 1 I Wasser, also m = 1 kg,  $\Delta P_1 = 35 \text{ W}$ ,  $\Delta P_2 = 53 \text{ W}$ ,  $\Delta P_3 = 72 \text{ W}$  und beispielsweise t = 1 h ergeben sich die Temperaturdifferenzen  $\Delta T_1 = 30,13 \text{ K}$ ,  $\Delta T_2 = 45,62 \text{ K}$  und  $\Delta T_3 = 61,98 \text{ K}$ .

Der Messaufbau zur Untersuchung, ob sich 11 Wasser auf eine sinnvoll nutzbare Temperatur erwärmen lässt, besteht aus einem Edelstahlgefäß gefüllt mit Wasser, in welches die Widerstände eingetaucht werden. Die Widerstände selbst befinden sich in dickwandigen Schrumpfschläuchen, damit diese nicht direkt mit dem Wasser in Berührung kommen können und somit Kurzschlüsse vermieden werden. Die verwendeten Widerstände in den Schläuchen sind links in Abbildung 16 zu sehen. In der selben Abbildung auf der rechten Seite ist eine Nahaufnahme eines eingetauchten Widerstandes zu erkennen. Ebenfalls deutlich zu erkennen ist eine Blasenbildung auf Grund der Wärmeabgabe des Widerstandes. Die Messung wird mit Hilfe einer Stoppuhr und eines digitalen Thermometers, welches sich im Wasser befindet, durchgeführt.



Abbildung 16 Lastwiderstände in Schrumpfschläuchen (links) und Edelstahlgefäß mit versenktem Lastwiderstand

Die Ergebnisse dieser Messungen sind tabellarisch in Anhang A.6 zu finden. Eine graphische Darstellung ist in Abbildung 17. Die Lastwiderstände selbst werden so ausgewählt, dass diese im mittleren bis mittelhohen Leistungsbereich der SEIG liegen. Insbesondere während des Tages ist eine mittlere Annahme, mit Ausnahme der Lastspitzen, realistisch. Die Annahme wird aus den Daten aus der Semesterarbeit von Eisner [7] getroffen. In genannter Quelle werden Lastdiagramme für typische, nepalesische Haushalte erstellt. Beispiele für diese Diagramme sind in Kapitel 5 gegeben. Der mittelhohe Leistungsbereich (hier 72 W) wird vermutlich eher in der Nacht erreicht.

Im Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass innerhalb von zwei Stunden bereits mit 35 W eine Temperaturerhöhung von über 25 K erreicht werden kann. Bei 72 W wird eine Endtemperatur von 68,4 °C nach zwei Stunden erzielt.

Im Gesamten sind die erzielten Temperaturerhöhungen im gegebenen Zeitraum praktisch gut nutzbar. In Nepal wird noch häufig mit Holz geheizt und gekocht. So reduziert sich beispielsweise der Bedarf an Feuerholz zum Wasserkochen, wenn dieses bereits eine höhere Temperatur aufweist. Dies spart Zeit und Geld für die Nutzer dieser Technologie.

Im Vergleich zu den berechneten Werten sind die hier gemessenen deutlich geringer. Dies liegt vor allem am offenen Edelstahlgefäß, welches sehr viel Wärme des Wassers an die Umgebung abgibt. In der Praxis ist ein isolierter Aufbau sinnvoll. Somit können die hier gezeigten Messergebnisse als schlechtestes- und die berechneten Werte als bestes Szenario eingestuft werden. Mit isolierten Gefäßen liegen die Temperaturen zwischen den gezeigten Werten.

An dieser Stelle sollte noch erwähnt werden, dass der betrachtete Zeitraum von zwei Stunden nicht repräsentativ für den Alltag ist. Über die Nacht wird vermutlich deutlich weniger Wasser benötigt als am Tag. Das heißt am Tag kann es bei größerem Bedarf auch vorkommen, dass bereits nach einer Stunde Erwärmung Wasser benötigt und entnommen wird. Über die Nacht können höhere Temperaturen als die hier maximal angegebenen 68,4 °C erreicht werden.

Der praktische Bedarf an warmen Wasser wird durch Aussagen aus [7] noch einmal verdeutlicht. Hier wird die Situation an einer Schule geschildert, in der ein Gerät zur elektrischen Erwärmung von Wasser vorhanden ist. Dieses wird jedoch nicht eingesetzt, da die Kosten des Betriebs für die Schule zu hoch sind. Diese Situation kann mit den hier gegebenen Vorschlägen behoben werden. Durch die Verwendung des ELC und einem Wasserrad entstünden für diese Schule nach einmaligen Investitionskosten keine weiteren laufenden Kosten (siehe hierzu auch Kapitel 7). Der Bedarf an warmen Wasser würde zudem gedeckt. In diesem Beispiel ist auch der Nutzen für die gesamte Bevölkerung höher, da nicht nur ein Haushalt, sondern insbesondere viele Schulkinder profitieren würden.

Für alle weiteren Tests und Messungen des Systems werden die Lastwiderstände wie in Abbildung 18 auf ein Stahlgestell geschraubt und mit den Relais am ELC verbunden.

Für einen Dauerbetrieb in einem Haushalt eignen sich die hier verwendeten Schrumpfschläuche sicher nicht. Zum einen sind sie nicht lebensmittelecht, zum anderen garantieren sie keine dauerhafte Dichtigkeit, was zu lebensgefährlichen Situationen führen kann. Daher wird empfohlen die Lastwiderstände mit Hilfe von Edelstahlblech zu verkapseln/ verschweißen, sodass diese wasserdicht sind.



Abbildung 17 Wassertemperaturentwicklung von V = 1 l mit verschiedenen Lastwiderständen



Abbildung 18 Lastwiderstände auf Stahlgestell

# 4.4. Electronic Load Controller

Der Electronic Load Controller besteht aus den im vorherigen Kapitel genannten Einzelkomponenten. Sie werden auf insgesamt zwei Lochrasterplatinen angebracht. Ein Foto des fertigen Testaufbaus ist in Abbildung 19 zu sehen. Die Schaltung ist vollständig im Stromlaufplan in Anhang A.1 dokumentiert. Im folgenden werden nur die wichtigsten Punkte diskutiert. Die Aufgabe des ELC besteht darin, die angeschlossenen Lastwiderstände so zu schalten,



Abbildung 19 Foto vom Testaufbau des Electronic Load Controllers

dass die zuvor beschriebenen Spannungsschwankungen auf ein Minimum beschränkt werden können.

## 4.4.1. Relaisschaltung

Zum Schalten der Lastwiderstände, welche in 4.3.1 beschrieben sind, werden Relais mit einer Schaltspannung von 12 V verwendet. Das Board (siehe 4.4.3) kann ebenfalls mit einer Spannung von 12 V versorgt werden. Daher kann diese auch für die Relais verwendet werden, ohne dass es einer zusätzlichen Spannungsquelle bedarf. Da die digitalen Ausgänge des ausgewählten Boards weder 12V schalten, noch den benötigten Strom für alle Relais bereitstellen können, wird hierzu eine negative-positve-negative (NPN)-Emitterschaltung mit Freilaufdiode und Schalttransistor am Relais aufgebaut.

# 4.4.2. Transformator und Gleichrichterschaltung

Um die Spannungsschwankungen ausgleichen zu können, muss die Spannung selbst zunächst gemessen werden. Neben einer relativ teuren Möglichkeit zum Anschluss eines Messgerätes mit entsprechender digitaler Schnittstelle an einen Controller, kann auch eine in vielen Steuerungen vorhandene Analog-Input-Schnittstelle verwendet werden. Die Idee dabei ist es die Strangspannungen des SEIG zuerst zu transformieren und anschließend gleich zu richten. Die gleichgerichtete Spannung kann dann am analogen Eingang einer Steuerung mit einem Spannungsteiler abgegriffen werden. Die Grundlagen zu diesem Konzept wurden bereits in der Forschungspraxis von Bottheim [9] herausgearbeitet und werden hier in leicht angepasster Form verwendet.

Mit einem Trafo mit festem Übersetzungsverhältnis, welcher nominell eine Eingangsspannung von 230 V und eine Ausgangsspannung von 3 V besitzt, wird eine für einen Analog-Eingang nutzbare Spannung erzeugt. Nach Gleichrichtung entsteht eine DC-Spannung, welche bei 230 V Strangspannung einen gemessenen Wert von 4,2 V DC aufweist. Mit einem Kondensator wird diese Spannung anschließend noch geglättet. Das in 4.4.3 ausgewählte Board hat eine analoge Referenzspannung von 5 V, welche extern verändert werden kann. Da bei Strangspannungen von bis zu 300 V die Referenzspannung überschritten wird, wird ein Spannungsteiler eingesetzt. Auf Grund von Verfügbarkeiten der Widerstände des Spannungsteilers wurde sich zudem dazu entschieden die Signalspannung von 3,3 V als Referenzspannung zu wählen. Dies kann in weiteren Entwicklungen des ELC verändert/ angepasst werden, indem entweder der Spannungsteiler selbst oder der Transformator verändert werden.

## 4.4.3. Auswahl des Control-Boards

Da es sich in dieser Arbeit um einen praktischen Testaufbau handelt, wird zunächst auf ein kommerziell erhältliches Entwicklungsboard zurück gegriffen. Für die Spannungsmessung werden analoge Eingänge benötigt. Hinzu kommen digitale Ausgänge, mit denen sich Relais schalten lassen. Die wohl aktuell bekanntesten Boards sind Arduino oder Raspberry Pi. Dabei besitzt das Raspberry Pi keine analogen Eingänge und ist teurer als ein Arduino-Board. Größere Steuerungen, welche auch in der Industrie eingesetzt werden (z. B. Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) oder Embedded Linux), kommen auf Grund der hohen Investitionskosten ebenfalls nicht in Frage. Daher wird sich für den Testaufbau für ein Arduino Uno Board, bzw. ein etwas günstigeres, kompatibles Board mit den selben Eigenschaften, entschieden. Die komplette Verschaltung ist in Anhang A.1 ab Folie 4 dargestellt.

# 4.4.4. Zukünftige Entwicklungen der Hardware

Der aktuelle Testaufbau hat einen sehr hohen Verdrahtungsaufwand und ist zunächst rein auf Funktionalität ausgerichtet. Insbesondere Lötarbeiten an den Lochrasterplatinen nehmen sehr viel Zeit in Anspruch. Für eine zukünftige Platinenentwicklung, sollen in diesem Abschnitt Erfahrungen und Empfehlungen weiter gegeben werden. Um die Komplexität und Verdrahtungsaufwand zu minimieren, die Robustheit zu erhöhen und um ein komplettes Produkt zu entwickeln, werden folgende Punkte festgehalten:

- Mit einer entsprechenden Software sollte ein Platinenlayout entwickelt werden, welches alle Komponenten des aktuellen Testaufbaus auf Lochrasterplatinen beinhaltet
- Um die Investitionskosten weiter zu reduzieren und ein Ein-Platinen-Layout zu erstellen, kann anstelle eines Entwicklerboards wie dem Arduino, direkt ein Mikrocontroller wie der Atmega328 mit entsprechend benötigter Peripherie (Quarz, Kondensatoren, Klemmen, usw.) auf der Platine angebracht werden
- Sowohl bei den Transformatoren, als auch bei den Relais können günstigere Hersteller als die verwendeten getestet werden
- Eine Pufferbatterie ist bereits im Schaltplan in Anhang A.1 vorgesehen. Zum Testen kam diese bislang jedoch nicht zum Einsatz, sodass diese zu einem späteren Zeitpunkt integriert werden kann. Durch eine zusätzliche Batterie, welche bei Ausfall des Generators zugeschaltet wird, ist eine Spannungversorgung des Boards weiter gewährleistet
- Light Emitting Diode (LED) können parallel zu den Relais verschaltet werden um den Schaltzustand ohne Messen per DMM und ohne eine Schnittstelle zum Beispiel zu einem Personal Computer (PC) erkennen zu können
- Bei Auswahl eines Transformators, welcher eine geringer Nenn-Ausgangsspannung besitzt, kann eventuell auf einen Spannungsteiler am Ende verzichtet werden

# 4.4.5. Programmierung des Controllers

In diesem Kapitel wird abschnittsweise der Code beschrieben, welcher für den ELC erstellt wurde. Der vollständige Code befindet sich in Anhang A.7

Nach Konstanten und Variablen-Deklaration zu Beginn wird der Referenzwert der Spannung für die Analogeingänge festgelegt

// Referenzspannung von Extern (verbunden mit 3,3 V von Board):
analogReference(EXTERNAL);

Anschließend werden die Pins 2 bis 11 als Ausgänge deklariert. Mit diesen Ausgängen werden später die Relais, siehe 4.4.1, geschaltet. Mit dem Aufruf der void loop() {-Funktion beginnt der kontinuierliche Durchlauf des folgenden Codes.

Zu Beginn wird die Strangspannung für alle drei Phasen ermittelt, hier beispielhaft für L1:

```
//Spannungsmessung:
// L1:
avgVoltL1 = 0.00;
for (int i = 0; i < 500; i++) {
analogA0 = analogRead(A0);
avgVoltL1 = avgVoltL1 + analogA0;
}
avgVoltL1 = avgVoltL1/500;
// Serial.println(avgVoltL1);
right_voltageL1 = avgVoltL1*0.349 + 43,222;
Serial.println(right_voltageL1);
```

Zunächst wird für jeden neuen Schleifendurchlauf der Durchschnittswert der Strangspannung avgVoltL1 auf Null gesetzt. Anschließend wird eine for-Schleife aufgerufen, welche 500 Analogwerte ausliest, addiert und den Durchschnitt bildet. Die analogen Eingänge eines Atmega328 liefern eine Auflösung von 1024 Bit. Das heißt, der analoge Spannungswert, welcher anliegt, hat einen Wert zwischen 0 und 1024. Daher wird diese Zahl mit einer Regressionsfunktion in einen Spannungswert right\_voltageL1 = avgVoltL1\*0.349 + 43,222; umgewandelt. Dieser wird weitergehend verwendet, da er wesentlich intuitiver einzusetzten ist. Darüber hinaus könnte eine Spannungsaufzeichnung wie in [9] beschrieben ergänzt werden. Zum erstellen der Funktion wird ein einstellbarer Labor-Trenntrafo verwendet um Spannungen von 0 V bis 280 V zu erzeugen. Mit einem Tabellenkalkulationsprogramm werden anschließend Spannungen und die Analogwerte in einem Diagramm aufgezeichnet. Ein Beispiel für ein solches Diagramm ist in Abbildung 20 zu sehen. Es ist zu beachten, dass in einem Bereich unter 50 V eine große Nichtlinearität zu beobachten ist. Da dieser Bereich durch den SEIG jedoch nie erreicht wird, da sich dieser vorher entregt und auf 0 V abfällt, kann der Bereich ohne Einschränkungen außer Betracht gelassen werden. Somit ergibt sich eine lineare Funktion. Im Vergleich zu Kontroll-Messungen mit DMM, kann eine Genauigkeit von ca.  $\pm 1$  V erreicht werden. Die beschriebene Methode zur Bestimmung der Strangspannungen ist folglich hinreichend genau und hat deutlich geringere Investitionskosten als beispielsweise der Einsatz spezieller Messgeräte (siehe hierzu auch Kapitel 7). Nachdem der aktuelle Spannungswert bestimmt ist, können die Relais bzw. die digitalen Ausgänge wie folgt geschaltet werden:

```
// Schalten von L1:
// Schaltmodi: Speicherung als integer in HelperResLoadL1 (Nr vor jeweiliger
Leistung)
// Sortiert nach Leistung:
// P(230V)/W R/kOhm Konfiguration Pin(s)
// 1: 11,255 4,7 4,7 11
// 2: 24,045 2,2 2,2 9
// 3: 35,301 1,499 2,2 || 4,7 9 & 11
```



Spannung und Analogwert Controller L1

Abbildung 20 Regressionsfunktion für Phase L1 zur Bestimmung der Strangspannung

//	4:	44,083	1,2	1,2	8			
//	5:	55,339	0,956	1,2    4,7	8	&	11	
//	6:	68,129	0,776	1,2    2,2	8	&	9	
//	7:	79,384	0,666	1,2    2,2    4,7	8	6	9 &	11

Hierzu werden Schaltbedingungen festgelegt, welche von zwei Variablen abhängen. Dies ist zum einen die Strangspannung right\_voltageL1 und zum anderen der vorherige Schaltmodus HelperResLoadL1. Die Schaltgrenzen von 245 V und 220 V sind dabei willkürlich festgelegt und beruhen zunächst auf Erfahrungswerten, um die jeweilige Strangspannung nahe an 230 V zu halten. Im ersten Schritt werden alle Ausgänge auf Low geschaltet, wenn die Strangspannung kleiner als 245 V ist. Übersteigt diese den Wert, wird Schaltmodus 1 aktiviert, bei dem zunächst die geringste Leistung von 11,255 W hinzu geschaltet wird. Bleibt die Spannung weiterhin über 245 V oder steigt erneut über diesen Wert, wird die nächst höhere Leistung von 24,045 W geschaltet usw. Das Hochschalten ist in folgendem Code ersichtlich:

```
//Schaltmodus 0:
if (right_voltageL1 <= 245 && HelperResLoadL1 == 0) {
    Serial.println("Schaltmodus_L1:_0");
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(11, LOW);
}
```

```
//Schaltmodus 1:
else if (right_voltageL1 > 245 && HelperResLoadL1 == 0) {
 HelperResLoadL1 = 1;
 Serial.println("Schaltmodus_L1:_1");
 digitalWrite(8, LOW);
 digitalWrite(9, LOW);
 digitalWrite(11, HIGH);
}
//Schaltmodus 2:
else if (right_voltageL1 > 245 && HelperResLoadL1 == 1) {
 HelperResLoadL1 = 2;
 Serial.println("Schaltmodus_L1:_2");
 digitalWrite(8, LOW);
 digitalWrite(9, HIGH);
 digitalWrite(11, LOW);
}
```

Sinkt die Spannung unter einen Wert von 220 V, wird der integer-Wert des Schaltmodus HelperResLoadL1 um die Ganzzahl 1 verringert, sodass beim nächsten Durchlauf der vorherige Schritt durchlaufen wird und somit die geschaltete Leistung reduziert. Dies funktioniert nur bis zu dem Zeitpunkt, bis alle Lasten abgeschaltet sind und der Schaltmodus 0 erreicht ist. Wenn das der Fall ist, wird am Ende immer der Schaltmodus 0 gesetzt. Beides ist in folgendem Codeschnipsel erkennbar:

```
if (right_voltageL1 < 220){
   HelperResLoadL1--;
}
if (HelperResLoadL1 < 0){
   HelperResLoadL1 = 0;
}</pre>
```

Nachdem das Programm wie beschrieben getestet wurde, treten Probleme bei der Stabilität der Spannung auf. Da die Zykluszeiten  $t_{cycl}$  des Programmdurchlaufs wesentlich geringer sind als die Zeit bis die Spannung nach dem Zu- oder Abschalten einer Last auf einen konstanten Wert eingeschwungen ist  $t_E$ . Hierdurch wird eine größere Last zu- oder abgeschaltet, als nötig. Dadurch sinkt oder steigt der Spannungswert wiederum weiter als er sollte, was ein erneutes zu- oder abschalten von Lasten zur Folge hat. Genauere Messungen und Diskussionen hierzu finden sich in Kapitel 5. Um dieses Phänomen zu verhindern, wird die Zeit  $t_E$  abgeschätzt und als Verzögerung wie folgt vor dem nächsten Schaltvorgang eingebaut:

```
// Zur Stabilisierung nach/ vor Schaltvorgängen (um Überschwingen zu
verhindern), Verzögerung mit millis():
```

Alle beschriebenen Vorgänge, welche sich auf die Phase L1 beziehen, sind äquivalent für die Phasen L2 und L3 im gesamten Code hinterlegt. Wie bereits zu Beginn erwähnt ist dieser im Anhang A.7 zu finden.

# 5. Systemvarianten

Bislang wurde nur das allgemeine System wie in Abbildung 1 mit Einzelkomponenten betrachtet. In diesem Kapitel sollen nun zwei Konzepte für Gesamtsysteme genauer unterschieden werden und aus Verbrauchersicht entschieden werden, welche sinnvoll sein können.

Dies ist zum einen eine dreiphasige Variante für ein bis drei Haushalte mit mindestens einer Phase pro Haushalt, je nach Bedarf. Zum anderen ist es ein 12 V System, welches pro Phase mit Hilfe je eines Schaltnetzteiles eine Spannung von 12 V erzeugt. Auch hier können die Netzteile auf ein bis drei Haushalte aufgeteilt werden. Der vollständige Testaufbau beider Systeme ist in Abbildung 21 zu sehen. Die einzelnen Besonderheiten werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels beschrieben.



Abbildung 21 Testaufbau des gesamten Systems im Labor

Die folgenden Ausführungen beziehen sich dabei ausschließlich auf Maschine A, da diese bereits in Nepal eingesetzt wird. Die Kapazität eines Kondensators wurde auf 3 µF festgelegt. Die genauen Schaltungen der Varianten A und B sind im Stromlaufplan in Anhang A.1 dokumentiert. Variante B unterscheidet sich schaltungstechnisch zunächst nur durch die Schaltnetzteile von Variante A. Die Netzteile werden an die Steckdosen auf Folie 3 angeschlossen.

Die Grundidee besteht bei beiden Varianten darin, die Spannung im Gesamtsystem möglichst nah an der Nennspannung von 230 V bzw. 12 V zu halten und zudem den Generator möglichst nah an Vollast zu betreiben. Auf diese Weise wird, wie in 4.1.4 beschrieben der höchste Wirkungsgrad erzielt und die Maschine wird thermisch nicht zu stark belastet, da der Blindstrom innerhalb des Generators minimiert wird.

# 5.1. Variante A

In diesem Kapitel wird das Gesamtsystem der Variante A beschrieben. Dazu gehören der ELC, die Lasten und die verschiedenen Verbraucher, welche in der Reihenfolge, in welcher

sie später geschaltet werden, der Tabelle 4 zu entnehmen sind. Variante A ist die einfachere von den beiden hier betrachteten Varianten, da das dreiphasige System des SEIG beibehalten wird und Verbraucher direkt angeschlossen werden können. Im Testaufbau ist dies mit Mehrfachsteckdosen an den im Plan eingezeichneten Steckdosen auf Folie 3 realisiert. Zur Spannungsstabilisierung kommt der ELC zum Einsatz, wie er in 4.4 beschrieben wird. Eine einphasige Prinzip-Skizze, welche in Abbildung 22 zu sehen ist, beschreibt den Aufbau der Variante A. Alle drei Phasen sind jedoch gleich aufgebaut.



Abbildung 22 Einphasige Prinzip-Skizze von Variante A

## 5.1.1. Testen des Systems mit Variante A

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie Belastungstests des Systems erstellt- und welche Messungen gemacht werden. Zunächst wird eine Auswahl an Verbrauchern, die den Verbrauchern vor Ort möglichst ähnlich sind, ausgewählt. Dies sind vor allem verschiedene Leuchtmittel wie Energiesparlampen, Glühlampen und LEDs. Hinzu kommen Netzteile, die das Laden von Lithium-Ionen Akkus in Mobiltelefonen nachstellen sollen und auch ein Schaltnetzteil, an welches ein 12 V-Fernsehgerät (TV) angeschlossen ist. Diese Art von TVs sind in Nepal weit verbreitet.

Um möglichst realitätsnahe Lastprofile zu schalten, wird auf Ergebnisse von [7] zurück gegriffen. Zwei Beispiele für Lastprofile von Haushalten in Nepal sind in den Abbildungen 23 und 24 dargestellt. Ziel ist es nicht den zeitlichen Verlauf nachzubilden, sondern vielmehr alle möglichen Laststufen in einer willkürlichen Reihenfolge nachzubilden. Hierzu wird beliebig die Reihenfolge der Verbraucher, welche zu- und abgeschaltet werden, festgelegt. Wichtig ist, dass sich eine Lastspitze ergibt und mehrere Zwischenstufen bis hin zu nahezu keiner Last, ähnlich wie es in den aufgezeichneten Profilen vor Ort zu sehen ist. Hinzu kommt eine Verteilung auf die drei Phasen, die in der Praxis nicht symmetrisch ist. Das resultierende Lastprofil für den Testzyklus ist in einem Diagramm in Abbildung 25 dargestellt.



Abbildung 23 Lastdiagramm eines Haushaltes in Nepal, aus [7]



Abbildung 24 Lastdiagramm einer Schule in Nepal, aus [7]

t/ min:s	Leistung/ W	An/ Aus	Phase	Verbraucher
0	15	an	L1	Energiesparlampe WEGA
5	5	an	L1	LED DIVYA
8	7	an	L1	LED Sun-Lite
16	6	an	L2	LED SCT
27	60	an	L3	Glühlampe Sylvania
37	10,6	an	L3	5 V Netzteil Samsung + Li-Ion Lader
41	15	aus	L1	Energiesparlampe WEGA
42	5	aus	L1	LED DIVYA
42	7	aus	L1	LED Sun-Lite
45	10,6	an	L1	5 V Netzteil Samsung + Li-Ion Lader
73	60	an	L1	Glühlampe Aprana
85		an	L2	Schaltnetzteil Leerlauf
85	11,7	an	L2	LED Müller
98	12	an	L2	TV Schaltnetzteil
109	15	an	L1	Energiesparlampe WEGA
120	5	an	L1	LED DIVYA
121	7	an	L1	LED Sun-Lite
136	60	aus	L1	Glühlampe Aprana
140	60	aus	L3	Glühlampe Sylvania
145	10,6	aus	L3	5 V Netzteil Samsung + Li-Ion Lader
152	12	aus	L2	Schaltnetzteil mit TV
152	11,7	aus	L2	LED Müller
158	7	aus	L1	LED Sun-Lite
158	5	aus	L1	LED DIVYA
158	15	aus	L1	Energiesparlampe WEGA
166	6	aus	L2	LED SCT

 Tabelle 4 Schaltreihenfolge für den Testzyklus Variante A



Abbildung 25 Lastdiagramm des Testzyklus für Variante A

## 5.1.2. Messung der Strangspannungen während des Testzyklus

Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 21 zu sehen. Mit Hilfe eines Analysators für Drehstromnetze (C.A 8336 (Qualistar+)) werden folgende Größen aufgezeichnet:

- Strangspannungen aller Phasen (im Messprotokoll V1 bis V3)
- Verkettete Spannungen aller Phasen (im Messprotokoll U1 bis U3)
- Strangströme aller Phasen
- DC-Anteile aller Spannungen und Ströme
- Scheitel- und Peakwerte von Spannungen und Strömen
- Frequenz
- Wirkleistung
- Blindleistung
- Scheinleistung
- Power Faktor
- $\cos \varphi$
- Total Harmonic Distortion, dt. "Gesamte harmonische Verzerrung" (THD) %r
- THD %f

Diskutiert werden die relevanten Messungen für Strangspannungen, Frequenz und THD. Weitere Messergebnisse können in Tabellen auf beigelegtem Datenträger eingesehen werden. Alternativ sind auch die Rohdateien hinterlegt, welche mit der zum Messgerät ausgelieferten Software betrachtet werden können.

#### 5.1.3. Anmerkungen zum Messverfahren

Die Ströme werden mit Messzangen direkt hinter den Klemmen des SEIG gemessen. Das heißt, die gemessenen Ströme entsprechen dem gesamten Strom, den der Generator liefert. Diese teilen sich später auf in die Ströme, die in die angeschlossen Lastwiderstände und Verbraucher fließt und die Ströme, die in die Kondensatoren fließen. Der gemessene Strom und somit auch die im Messprotokoll gegebenen Leistungen sind wesentlich höher, als jene die im Lastprofil im Diagramm gegeben sind oder die, welche die Maschine als reine Wirkleistung tatsächlich abgeben könnte. Da es bei den folgenden Untersuchen hauptsächlich um Spannungen und Auswirkungen der Lasten auf den Generator geht (hier und bei Variante B insbesondere die THD und Oberschwingungen), ist es sinnvoller die Messungen auf diese Art durchzuführen, da ansonsten die Werte für THD nicht vollständig wären.

Aufgrund der Auflösung, die mindestens 1s beträgt, werden minimale und maximale Werte für den Zeitraum bis zum nächsten Punkt mit angegeben.

## 5.1.4. Auswertung der Messungen von Strangspannung, Frequenz und THD

Nachfolgend werden zuerst die Strangspannungen diskutiert. Die verketteten Spannungen sind vom Verlauf her analog und werden daher nicht gesondert betrachtet. Anschließend wird die Veränderung der Frequenz f beschrieben. Am Ende wird die THD ausgewertet. Hinzu kommen noch Variationen beim Testaufbau. Es werden drei Messreihen durchgeführt. Zunächst wird eine Messreihe mit ELC erstellt. Anschließend wird exemplarisch ein instabiler Zustand, welcher durch PT<sub>2</sub>-Verhalten des Systems entstehen kann, gezeigt. Die zweite Messreihe wird ohne ELC vorgenommen, um einen Vergleich zur Messung mit ELC herzustellen.

Alle Messreihen werden zur besseren Vergleichbarkeit mit dem gleichen Testzyklus wie in Diagramm 25 mit Abweichungen von  $\pm 3$  s durchgeführt.

Tabelle 5 Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Strangspannungen

$V1_{min}$	$V2_{min}$	$V3_{min}$	$V1_{av}$	$V2_{av}$	$V3_{av}$	$V1_{max}$	$V2_{max}$	$V3_{max}$
158,1	121,4	143,5	228,2	231,5	223,7	272,4	272,3	273,6

Tabelle 6 Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Frequenz 

$f_{min}$	$f_{av}$	$f_{max}$
48,12	49,04	49,65

1



Abbildung 26 Gemessene Strangspannungen der Variante A mit ELC



Abbildung 27 Gemessene Frequenz und THDr der Variante A mit ELC

#### Auswertung Strangspannung

Im Diagramm in Abbildung 26 sind die Verläufe der Strangspannungen dargestellt. Mit gepunkteten Linien über bzw. unter den gleichfarbigen soliden Linien werden die maximalen bzw. minimalen Werte der gemessenen Strangspannungen dargestellt. Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Strangspannungen sind in Tabelle 5 zu finden.

Nach dem ersten Maximum zu Beginn, welches durch den Leerlauf des SEIG verursacht wird, schaltet sich der ELC ein, der entsprechend Lastwiderstände zuschaltet. Hierdurch fallen alle Strangspannungen auf einen Wert von ca. 225 V. Zum Zeitpunkt t = 0 s wird die erste Last auf Phase L1 zugeschaltet. Hierdurch fällt die Strangspannung V1 auf unter 220 V ab. Dies bezweckt etwas verzögert auch einen Spannungsfall auf den beiden anderen Phasen L2 und L3, jedoch nicht so stark wie an der Phase, an welcher die Last geschaltet wird. Diese Beobachtung kann allgemein bei allen Schaltereignissen festgestellt werden.

Durch den Abfall der Spannung auf unter 220 V, schaltet der ELC Lasten ab. Hierdurch steigt die Strangspannung von L1 sprunghaft auf einen Wert von 254 V. Der Anstieg der Spannung fällt deshalb so groß aus, weil der ELC zu viel Last auf einmal abschaltet. Dies ist bedingt durch eine regelungstechnische Abwägung, die im folgenden Abschnitt näher erläutert wird. Allgemein ist beim Schalten von Lasten kleiner 15 W eine sehr gute Spannungshaltung mit wenig Überschwingung und damit Spannungs-Amplituden zu erkennen. Verbraucher, die in diesem Leistungsbereich liegen, werden hauptsächlich vor Ort eingesetzt. Die Spannung bleibt durch diese Schaltvorgänge in einem Bereich von ca.  $\pm 10$  V.

Um das System auch für extremere Schaltvorgänge zu testen, welche in der Praxis wahrscheinlich selten vorkommen werden, sind zwei Glühlampen mit je 60 W im Testzyklus integriert. Im Vergleich zu den beiden Diagrammen der Lastprofile vor Ort in den Abbildungen 23 und 24, wird dies deutlich. Die größten hier geschalteten Lasten betragen ca. 20 W. Die Schaltzeitpunkte der Glühlampen im Testzyklus nach 27 s, 73 s, 136 s und 140 s sind deutlich als große Peaks im Diagramm erkennbar. Das größte Minimum der Spannung wurde mit 144 V nach 27 s gemessen. Dieser Wert wird jedoch weniger als 1 s lang gemessen, bevor sich die Spannung wieder in den gewünschten Bereich einschwingt.

Die höchste Gesamtbelastung für den Generator beginnt bei 121 s. Die Leistung, die hier erreicht wird ist nach Abbildung 25 bei ca. 200 W. Durch die hohe Last, insbesondere auf den Phasen L1 und L3, kann die Spannung nicht mehr im Schaltbereich von  $220 \text{ V} < U_{Str} < 245 \text{ V}$  gehalten werden und sinkt hier auf unter 210 V. Ab diesem Zeitpunkt sind keine zusätzlichen Lasten vom ELC zugeschaltet und das Maximum an Leistung, welche der SEIG abgeben kann, ist erreicht. Dennoch ist das System an diesem Extrempunkt voll operabel.

Allgemein ist noch festzustellen, dass beim Abschalten von Lasten geringere Spannungs-Amplituden auftreten, als es beim Zuschalten der Fall ist. Eine Erklärung hierfür ist, dass die maximal erreichbare Spannung beim Anlaufen im Leerlauf erreicht wird. Diese liegt bei ca. 295 V, was durch die fixe Drehzahl eine Schranke nach oben ist. Nach unten liegt die Grenze bei 0 V, wenn der SEIG sich entregt.

#### Auswertung Frequenzverlauf

In Abbildung 27 ist unter anderem der Verlauf der Frequenz dargestellt. Im Vergleich zum bereits beschriebenen Spannungsverlauf ist dieser von der Form nahezu identisch. Wie zu erwarten, steigt und sinkt folglich die Frequenz mit der Spannung.

Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Frequenz sind Tabelle 6 zu entnehmen. Der Mittelwert von 49,04 Hz zeigt, dass die Kapazität der Kondensatoren für die wünschenswerten 50,00 Hz noch etwas verändert werden könnten. Jedoch ist es schwierig Kondensatoren mit genau diesen Kapazitäten zu finden. Ein Parallelschalten mit weiteren würde das System teurer machen. Der Minimalwert der Frequenz von 48,12 Hz entspricht einer Abweichung vom Mittel von -1,88%. Der Maximalwert der Frequenz von 49,65 Hz entspricht einer Abweichung vom Mittel von 1,24%. In Anbetracht dessen, dass keine komplexe Regelung und keine gesonderten Maßnahmen zur Frequenzhaltung betrieben wurden, sind die erzielten Ergebnisse als sehr gut einzustufen. In der Praxis werden in diesen Bereichen in einem Inselsystem keine Probleme auftreten.

#### Auswertung THD

Zusätzlich zur Frequenz sind in Abbildung 27 auf der zweiten y-Achse die THDr-Werte für alle drei Strangspannungen abzulesen. Bei THD ist zwischen THDr und THDf zu unterscheiden. Beide werden in % angegeben. Bei THDr handelt es ich um den Gesamtverzerrungsfaktor bezüglich Root mean square, dt. Wurzel quadratisches Mittel (RMS) Alternating Current, dt. Wechselstrom (AC). Bei THDf handelt es sich um den Gesamtverzerrungsfaktor bezüglich der Grundschwingung. Da bisher nur RMS-Werte betrachtet wurden, wird auch bei der THD

der Bezug zu RMS beschrieben.

Im Gegensatz zur Frequenz, korreliert die Verlaufsform der THDr nicht mit dem Verlauf der Strangspannungen. Auch die Beeinflussung der Phasen untereinander ist nicht so stark ausgeprägt.

Die Werte der THDr bewegen sich zwischen 5% und 13%. Insbesondere die Werte über 10% sind während des Testbetriebes "hörbar". Der SEIG beginnt bei diesen Werten Geräusche abzugeben, welche zuvor nicht hörbar waren. Spür- oder sichtbare Schwingungen oder Vibrationen sind jedoch nicht festzustellen. Eine mechanische Messung diesbezüglich wurde nicht durchgeführt, weshalb diese Beurteilung nur eine objektive Beobachtung ist, die nicht belegt werden kann.

Der größere Zusammenhang ist zwischen geschalteten Verbrauchern und Höhe der THD zu sehen. Direkt zu beginn bei 0 s wird eine Energiesparlampe auf Phase L1 zugeschaltet. Diese bezweckt von allen Verbrauchern den höchsten Anstieg der THD auf der selben Phase. Die Werte der Phasen L2 und L3 steigen ebenfalls an, jedoch deutlich weniger stark. Auch die parallelen Verläufe ähneln sich weniger wie beispielsweise bei den Strangspannungen zuvor. LEDs und Netzteile verursachen im Vergleich zur Energiesparlampe weniger THD. Hier sind nur sehr geringe Anstiege zu den Schaltzeitpunkten erkennbar.

Ohmsche Lasten wie die Glühlampen beeinflussen die THD in einer positiven Weise, indem sie bei mehreren geschalteten Lasten den Wert der THD nach unten ziehen. Dies wird insbesondere beim Abschalten dieser Lasten sichtbar. Bei 136 s und 140 s werden die Glühlampen auf Phase L1 und L3 ausgeschaltet. Hierdurch erhöhen sich die Werte der THD auf beiden Phasen.

Zusammenfassend kann in Bezug auf die THD gesagt werden, dass Lasten, die eine Induktivität oder Elektronik aufweisen so wie Energiesparlampen und LEDs die Spannungsqualität verschlechtern, indem die THD steigt. Dabei ist die hier verwendete Energiesparlampe besonders hervorzuheben, da sie für den größten Anstieg verantwortlich ist. Da keine weiteren Energiesparlampen getestet wurden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass dies auch ein bauartspezifisches Problem sein kann. Ohmsche Lasten hingegen beeinflussen die THD in einem positiven Sinne, wenn bereits die erwähnten Lasten geschaltet sind. Diese Beobachtung ist jedoch nicht als gemein gültig anzusehen, da durch den ELC ebenfalls ohmsche Lasten geschaltet werden und die Höhe der geschalteten Leistung nicht gesondert überwacht wird, weshalb diese auch nicht mit in Betracht gezogen werden können.

#### 5.1.5. Regelungstechnisches Verhalten des Testsystems mit ELC

Nach Beobachtung besitzt das Gesamtsystem ein  $PT_2$ -Verhalten mit Überschwingen. Zur einfacheren Erläuterung wird dies mit Hilfe des Diagramms in Abbildung 28 diskutiert. Wird beispielsweise eine Last abgeschaltet, so steigt die Spannung sprunghaft an und schwingt mit der Periodendauer  $T_e$  über einen Zeitraum  $T_E$  bis ein stabiler Spannungswert erreicht ist. Da es sich hierbei um Strangspannungen handelt, soll an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass der RMS-Wert der Spannung schwingt. Dies ist nicht mit AC-Schwingungen der Spannung zu verwechseln. Das Einschwingen  $T_E$  erfolgt innerhalb von ca. 1 s bis 3 s. Innerhalb von 1 s liegt die Periodendauer. Dies wird aus den Peaks in Abbildung 26 deutlich. Die Auflösung des Messgerätes ist nicht ausreichend hoch um die Parameter innerhalb dieser geringen Zeitspannen genau bestimmen zu können. Hinzu kommt, dass der "Sprung", welcher auf das System gegeben wird, durch unterschiedliche Lasten auch unterschiedlich hoch ist. Dennoch wird versucht die Periodendauer abzuschätzen. Hierdurch lässt sich eine Schaltverzögerung programmieren. Dies hat zur Folge, dass der ELC ca. eine Periodendauer "wartet" um nicht in einem Moment des Überschwingens zu schalten. Dies hätte zur Folge, dass ein noch größeres Überschwingen durch das Schalten einer größeren Last als nötig entsteht. Wie die Schaltverzögerung programmiert ist, ist in Kapitel 4.4.5 nachzulesen.



Abbildung 28 Strukturbild eines PT2-Gliedes

Mathematisch lässt sich das PT<sub>2</sub>-Verhalten des Systems mit einer Differentialgleichung beschreiben. Nach Laplace-Transformation in den Bildbereich, lässt sich die Übertragungsfunktion als rational gebrochene Funktion in Polynom-Darstellung abbilden:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot D \cdot T \cdot s + 1}$$
(5.1)

mit  $T=\frac{1}{\omega_0}, s=\delta+j\omega$ 

Mit einem Oszilloskop oder anderen Messgeräten mit höherer Auflösung könnte die Übertragunsgfunktion genau bestimmt werden und somit das Schaltverhalten des ELC optimiert werden. Aus Beobachtung ist nur bekannt, dass 0 < D < 1 und  $T_e \leq 1$  s.

## 5.1.6. Instabiles Verhalten mit ELC

Im Folgenden wird ein Beispiel dafür gegeben, wie sich der ELC ohne programmierte Verzögerungszeit beim Schalten verhält. Das zugehörige Diagramm ist in Abbildung 29 zu finden. Die Programmierung, welche dieses Verhalten verhindert wurde bereits in 4.4.5 beschrieben. Das allgemeine regelungstechnische Verhalten wurde ein Kapitel zuvor in 5.1.5 beschrieben. Zu Beginn ist im genannten Diagramm die Strangspannung auf allen drei Phasen konstant. Nach ca. 3 s wird manuell eine Last auf allen drei Phasen geschaltet, durch welche die Spannung deutlich unter die eingestellte Grenze von 220 V sinkt. Sofort schaltet der Controller Last ab. Hierdurch steigt die Spannung zunächst auf 211 V und dann weiter auf nahezu 270 V. Dieser zweite Schaltschritt fällt viel zu groß aus. Wie bereits beschrieben ist die Zykluszeit des ELC deutlich geringer als die Zeit bis sich eine konstante Spannung einstellt bzw. einschwingt. Hierdurch "misst" der Controller mehrfach eine Spannung, welche unter 220 V liegt und schaltet mehr Last ab, als er sollte.

Direkt nach dem Schaltvorgang liegen nun 270 V am ELC an. Hierdurch schaltet dieser wieder bedingt durch "Mehrfachmessung" - sofort eine größere Last zu. Hierdurch sinkt die Spannung wieder unter 220 V und die beschriebenen Schritte beginnen von vorne.

Es entsteht ein instabiles Schwingungsverhalten, das jedoch durch die maximalen und minimalen Spannungsgrenzen (je nach Last) des Systems begrenzt ist. Auch bei weiteren Messungen konnte dieses Verhalten reproduziert werden. Hinzu kommt, dass die Schwingung auch bei weiterem hinzu- und abschalten von Verbrauchern bestehen bleibt. Das Resultat sind beispielsweise Leuchtmittel, welche mit der Frequenz der Schwingung heller und dunkler werden. Über diesen störenden Effekt hinaus, kann der ELC seine Aufgabe nicht erfüllen. Im Gegenteil, er produziert noch mehr Spannungsspitzen, als ohne Controller. Hierdurch werden mittel- und langfristig elektrische Verbraucher geschädigt.

Das Einstellen der nötigen Verzögerungszeit wird in oben genannten Kapiteln beschrieben. Eine Allgemeingültigkeit für andere Systemkomponenten, insbesondere andere Generatoren, haben die hier präsentierten Zeiten jedoch nicht.

#### 5.1.7. Bezug zu Regularien in Nepal

In [22] werden die Simulationsergebnisse eines ELC mit den Microgrid-Regularien in Nepal verglichen. Werden diese Grenzen von  $\pm 10\%$  bei Spannungen, bei der Frequenz +3%, -2% und bei THD  $\pm 5\%$  hergenommen, lässt sich feststellen, dass die Frequenz diesen Bereich einhält. Auch die Strangspannungen bleiben in diesem Bereich. Bei der Frequenz ist jedoch einzuschränken, dass von einer Nennfrequenz von 50 Hz ausgegangen wird, weshalb die absoluten Grenzen nicht eingehalten werden. Bei den Spannungen muss eine Einschränkung bezüglich der sehr kurzen aber großen Amplituden gegeben werden, welche ebenfalls über die Grenzen hinaus gehen. Die Werte, die bei der THD gemessen wurden weichen jedoch zu stark ab.

Das hier vorliegende Inselsystem erfüllt folglich nicht die Anforderungen an ein Microgrid in Nepal. Dennoch sind die Messergebnisse sehr nah an diesen Regularien. Das heißt zum einen, dass mit zusätzlicher Elektronik und Regelung in Zukunft ein Wasserrad mit SEIG in ein Microgrid integriert werden kann. Zum anderen zeigt es auch, mit wie wenig Aufwand (nur ein ELC, der ohmsche Lasten schaltet), ein solides Inselsystem gebaut werden kann.


Abbildung 29 Schwingungsverhalten der Strangspannung bei instabilem Verhalten

### 5.1.8. Ergänzende Erkenntnisse zum Testzyklus

Je kleiner die Leistung der Maschine und damit rotierende Masse und Trägheit, umso stärker wirken sich alle Einflüsse direkt aus. Daher ist es umso schwieriger stabile Werte für Spannungen und Frequenz zu erzielen. Dies zeigt sich an den Erkenntnissen aus Anhang A.5. Zusätzlich wurde bereits festgestellt, dass ein einphasiger Betrieb mancher Maschinen mit geringer Leistung gar nicht möglich ist.

In Bezug zu den bisher dokumentierten Messergebnissen heißt dies zum einen, dass eine wesentlich höhere Dynamik beim Schalten des ELC vorliegt. Zum anderen aber auch, dass bei Spannungs- und Frequenzhaltung sowie der THD bei leistungsstärkeren Maschinen bessere Ergebnisse mit dem ELC werden können. Auf der anderen Seite heißt das aber auch, dass es ab einem bestimmten Punkt wenig sinnvoll ist Maschinen mit noch geringerer Leistung zu verwenden.

### 5.2. Variante A ohne ELC

In diesem Kapitel werden Messergebnisse der Variante A ohne ELC diskutiert und mit denen von Variante A mit ELC verglichen. Alle weiteren Annahmen, der Testaufbau, der Testzyklus (siehe Tabelle 4) und die Messmethodik bleiben unverändert.

### 5.2.1. Auswertung der Messungen von Strangspannung, Frequenz und THD

Wie zuvor werden zuerst die Strangspannungen diskutiert. Anschließend wird die Veränderung der Frequenz beschrieben. Am Ende wird die THD ausgewertet. Der Testzyklus ist der gleiche wie bei Variante A mit ELC, wobei Abweichungen durch händisches Schalten von  $\pm 3$ s auftreten können.

### Auswertung Strangspannung

Im Diagramm in Abbildung 30 sind die Verläufe der Strangspannungen dargestellt. Mit gepunkteten Linien über bzw. unter den gleichfarbigen soliden Linien werden die maximalen bzw. minimalen Werte der gemessenen Strangspannungen dargestellt. Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Strangspannungen sind in Tabelle 7 zu finden.

Im Leerlauf zu Beginn liegen die Werte der Strangspannungen aller drei Phasen bei etwa 295 V. Da kein ELC angeschlossen ist sinkt dieser Wert auch zunächst nicht ab. Dennoch wird sich dafür entschieden die Drehzahl der Antriebsmaschine und somit die Leerlaufspannung des Generators nicht zu verringern. Zum einen wäre dann keine Vergleichbarkeit mit der Variante mit ELC gegeben, zum anderen würde sich der SEIG bei hoher Belastung entregen und gar keine Spannung bzw. Leistung mehr liefern.

Nach den ersten Schaltvorgängen von Energiesparlampe (0 s) und LEDs (5 s, 8 s und 16 s), sinken die Strangspannungen zwischen 3 V auf L3 und mehr als 10 V auf L1. Ähnlich wie auch zuvor, entstehen auch hier beim Zuschalten der Verbraucher Spannungsamplituden. Sie unterscheiden sich nur darin, dass sie nur in negativer Richtung verstärkt auftreten. Mit

114,2 V auf L1 und 117,4 V auf L2 sind zwei Extremwerte deutlich kleiner als zuvor. Relativ zur Ausgangsspannung, welche bei den ersten Schaltvorgängen deutlich höher ist, ist der Abfall noch größer. Mit 176,3 V liegt der Wert auf L3 jedoch deutlich höher.

Nach dem Schalten der Glühlampe nach 27 s zeigt sich bereits ein weiterer Unterschied zur Variante A mit ELC. Die Spannungsunterschiede der Phasen zueinander fallen hier deutlich größer aus. Zwischen L1 und L3 ist die Differenz über 22 V.

Über den kompletten Zeitraum beträgt die Spannungsschwankung, mit Ausnahme der Amplituden, 84 V.

Generell lässt sich ein wesentlich deutlicherer Zusammenhang zwischen dem Lastdiagramm in Abbildung 25 und den Strangspannungen erkennen. Je höher die Last, desto mehr sinkt die Spannung und umgekehrt. Da dieser Zusammenhang bereits aus 3 bekannt ist, war dies auch so zu erwarten.



Abbildung 30 Gemessene Strangspannungen der Variante A ohne ELC

$V1_{min}$	$V2_{min}$	$V3_{min}$	$V1_{av}$	$V2_{av}$	$V3_{av}$	$V1_{max}$	$V2_{max}$	$V3_{max}$
114.2	117.4	176.3	265.1	273.3	261.8	298.1	299.5	302.7

 Tabelle 7 Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Strangspannungen

### Auswertung Frequenzverlauf

In Abbildung 31 ist der Verlauf der Frequenz ohne ELC dargestellt. Auch hier ist der Verlauf im Vergleich zu den Strangspannungen von der Form nahezu identisch. Extremwerte und der Arithmetische Mittelwert der Frequenz sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

Der Mittelwert liegt bei 50,50 Hz. Die minimale Abweichungen beträgt -3,21% bei einem Wert von 48,88 Hz. Die maximale Abweichungen beträgt 2,38% bei einem Wert von 51,70 Hz. Es zeigt sich einmal mehr die Schwierigkeit bei Festlegung der Höhe der Kapazitäten. In diesem Fall ist die Frequenz im Mittel etwas zu hoch (Ziel: 50,00 Hz), mit Controller ist sie jedoch zu gering. Bereits geringe Änderungen auf Verbraucherseite können folglich schon einen größeren Einfluss haben.

 Tabelle 8 Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Frequenz

$f_{min}$	$f_{av}$	$f_{max}$
48.88	50.50	51.70

### Auswertung THD

Zusätzlich zur Frequenz sind in Abbildung 31 auf der zweiten y-Achse die THDr-Werte für alle drei Strangspannungen abzulesen.

Die Werte der THDr bewegen sich zwischen 7% und 14,5%. Die Erkenntnisse, welche in der Auswertung der THDr bei Variante A mit ELC gefunden wurden, können auch hier bestätigt werden. Darunter auch die Vermutung, dass mehr ohmsche Lasten die THD senken können. Da hier generell weniger ohmsche Lasten durch einen Verzicht auf den ELC geschaltet sind, ist die THD im Gesamten etwas größer.

### 5.2.2. Zusammenfassung und direkter Vergleich - System mit und ohne ELC

Zum Abschluss des Kapitels zur Variante A, werden hier die wichtigsten Punkte zusammengefasst, um damit zu zeigen, welche Erfolge mit Hilfe des Controllers erzielt werden können. Vorteile beim Einsatz des ELC:

- Begrenzen der Strangspannungen auf einen festgelegten Bereich, welcher verträglich ist für elektrische Verbraucher
- Reduzierung des Spannungsbereiches (ohne Peaks < 1 s); ohne ELC: 84 V, mit:40 V
- Reduzierung der maximalen Höhe negativer Amplituden beim Schalten



Abbildung 31 Gemessene Frequenzen und THDr der Variante A ohne ELC

- · Geringere Abweichungen der Frequenz vom Mittelwert
- Verbesserung der THDr um mehr als 1,5%-Punkte
- Mehrnutzen durch warmes Wasser
- Geringere Spannungsdifferenz unter den Phasen
- Ausnutzung eines größeren Leistungsbereiches

Nachteile beim Einsatz des ELC:

- Zusätzliche Kosten (siehe Kapitel 7)
- Zusätzlicher Verdrahtungsaufwand
- Zusätzliche, kurze Spannungsamplituden durch Schalten des ELC

Die Vorteile überwiegen deutlich den Nachteilen, weshalb ein Einsatz eines ELC, wie er im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, sehr sinnvoll ist. Da keine Langzeit-Statistiken oder Ergebnisse erhoben wurden, kann nur spekuliert werden, inwiefern die Investitionskosten des ELC durch Verlängerung der Lebensdauer von elektrischen Verbrauchern und dem Generator amortisiert werden können. Das Hauptargument ist jedoch der Zusatznutzen des warmen Wassers, welches verwendet werden kann.

### 5.3. Variante B

In diesem Kapitel wird das Gesamtsystem B beschrieben. Dazu gehören der ELC, die Lasten, drei Schaltnetzteile und verschiedene 12 V-Verbraucher. Diese sind in Tabelle 11 in der Reihenfolge, in der sie geschaltet werden, eingetragen. Variante B ist eine erweiterte Version von Variante A. Anstelle der Mehrfachsteckdosen wird hier je ein Schaltnetzteil an den im Plan eingezeichneten Steckdosen auf Folie 3 in Anhang A.1 angeschlossen. Die Spannungsstabilisierung mit dem ELC erfolgt auf die gleiche Weise wie zuvor. Er wird direkt an die drei Phasen des SEIG angeschlossen. Eine einphasige Prinzip-Skizze, welche in Abbildung 32 zu sehen ist, beschreibt den Aufbau der Variante B. Alle drei Phasen sind identisch aufgebaut.



Abbildung 32 Einphasige Prinzip-Skizze von Variante B

### 5.3.1. Die verwendeten Schaltnetzteile

Die Hauptkomponente, durch welche sich Variante B von Variante A unterscheidet, sind die verwendeten Schaltnetzteile. Eines dieser Netzteile ist in Abbildung 33 zu sehen. Sie sind günstig (siehe auch Kapitel 7), robust und weltweit (eventuell in abgewandelten Formen) verfügbar. Die Netzteile haben folgende Nenn-Spezifikationen:

- Leistung: 100 W
- Eingangsspannung: 110 V bis 250 V AC
- Eingangsfrequenz: 50 Hz bis 50 Hz
- Ausgangsspannung: 11 V bis 13 V Direct Current, dt. Gleichstrom (DC)
- Ausgangsstrom: maximal 8,5 A

Da, wie bereits bei Variante A gezeigt, Spannungen über 250 V auftreten können und auch einzelne Peaks nahe bei 110 V liegen, werden mit Hilfe eines Labor-Trenntrafo die Grenzen der Schaltnetzteil praktisch getestet. Hierzu wird die Spannung des Labor-Trenntrafo langsam erhöht bzw. gesenkt, bis die gemessene Ausgangsspannung am Netzteil vom einge-

stellten Nennwert von 12,00 V DC abweicht. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 9 und 10 zu sehen. Zwischenschritte sind nicht in der Tabelle eingetragen, da nur die Spannungen wichtig sind, bei der auch eine Veränderung der Nennspannung eintritt. In Tabelle 9 ist der Leerlauffall des Schaltnetzteiles gegeben. Das heißt, es sind keine Verbraucher am Netzteil angeschlossen. In Tabelle 10 ist ein Lastfall gegeben. Hier ist eine ohmsche Last von 72 W (zwei 1  $\Omega$ -Widerstände) angeschlossen.

	$U_{in,AC}$ / V	$U_{out,DC}$ / V
Nenn	230	12,00
Max	283	12,00
Min	28	12,00

Tabelle 9 Spannungen am Schaltnetzteil im Leerlauf

Tabelle 10 Spannungen am Schaltnetzteil mit 72 W-Last

	$U_{in,AC}$ / V	$U_{out,DC}$ / V
Nenn	230	12,00
Max	281	12,00
<12 V	110	11,99
Min	60	11,8

Die maximale Spannung, die der Labor-Trenntrafo ausgegeben kann, liegt - etwas variierend durch die Last - bei ca. 280 V. Sowohl ohne, als auch mit Last zeigt das Schaltnetzteil auch nach 30 min keine Auffälligkeiten. Bis zu diesen Spannungen kann es folglich problemlos betrieben werden, insbesondere da diese hohen Spannungen mit ELC nicht auftreten.

Die minimale Spannung, bei der im Leerlauf eine konstante Ausgangsspannung gemessen werden konnte, liegt bei einer Eingangsspannung von 28 V. Bei dieser Spannung schaltet sich das Netzteil immer wieder kurzzeitig aus. Die Ausgangsspannung sinkt jedoch nicht unter 12 V.

Die minimale Spannung, bei der im Lastfall eine konstante Ausgangsspannung gemessen werden konnte, liegt bei einer Eingangsspannung von 111 V. Bei 110 V, was gleichzeitig noch im Bereich der Nenn-Eingangsspannung liegt, beginnt die Ausgangsspannung auf einen Wert unter 12 V zu sinken. Bei 60 V schaltet sich das Netzteil immer wieder kurzzeitig aus. Die Ausgangsspannung ist hier bereits auf 11,8 V gesunken.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Netzteile im Praxistest deutlich höhere und niedrigere Eingangsspannungen verwerten können, als angegeben. Das heißt auch, dass sie ohne Einschränkungen für die Variante B verwendet werden können. Die zwei beschrieben Fälle Leerlauf und 72 W Last sind zudem zwei Extremfälle, welche auftreten können. Viel mehr als 72 W sind nicht realistisch, da das gesamte System für maximal 190 W bis 200 W ausgelegt ist.



Abbildung 33 Foto von einem der verwendeten Schaltnetzteile

#### Parallelschalten der Schaltnetzteile:

Um eine Vereinfachung für die Nutzer des Systems zu erzielen, kann es sinnvoll sein die drei Schaltnetzteile parallel zu verschalten um aus einem dreiphasigen AC-System ein einziges DC-System zu erhalten. Hierzu müssen alle drei Netzteile exakt auf die gleiche Ausgangsspannung eingestellt werden. Da diese aber nur über ein analoges Potentiometer zur Einstellung der Ausgangsspannung verfügen, kann im Praxistest nur eine Genauigkeit bis auf die zweite Nachkommastelle erreicht werden. Durch die Spannungsdifferenz von einem Netzteil zum nächsten können im Lastfall nicht alle Netzteile den gleichen Anteil an Strom liefern. Hierdurch werden die Netzteile und somit auch die Phasen des Generators ungleich belastet. Bei Messungen mit mehreren Lasten konnte ein Strom von 8,5 A an einem Netzteil gemessen werden. Zum gleichen Zeitpunkt lieferten die anderen beiden Netzteile Ströme mit 1,5 A und 0,5 A. Dies ist nicht wünschenswert, da ein Netzteil immer wesentlich früher maximale Leistung abgibt, als die beiden anderen, was zum einen zu Defekten führen kann und zum anderen den Generator dauerhaft unsymmetrisch belastet, da die Last auf einer Phase sehr hoch ist (100 W) im Vergleich zur gesamten Leistung des Generators (190 W bis 100 W).

Neben den hier beschriebenen Netzteilen gibt es auch solche, die parallelschaltfähig sind. Diese finden meist im industriellen Umfeld Anwendung und sind daher deutlich teurer als die hier verwendeten. Da die Investitionskosten (siehe Kapitel 7) eine große Rolle spielen, kommt diese Variante nicht in Betracht.

Eine weitere Möglichkeit sind Netzteile, welche direkt eine dreiphasige Eingangsspannung in eine DC-Ausgangsspannung wandeln. Der Nachteil dieser Netzteile ist jedoch, dass eines dieser Netzteile ebenfalls erheblich teurer ist als drei einphasige, weshalb auch diese Variante ausscheidet.

Aus diesem Grund wird auf drei separate DC-Systeme gesetzt, wobei bei einer Erweiterung durchaus die Möglichkeit besteht auf eine der anderen beiden Möglichkeiten zu wechseln.

### 5.3.2. Testen des Systems mit Variante B

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie Belastungstests des Systems erstellt- und welche Messungen gemacht werden. Zunächst wird eine Auswahl an Verbrauchern, die den Verbrauchern vor Ort möglichst ähnlich sind, ausgewählt. Dies sind zwei LED Lichtleisten, ein 12V-TV und ein DC-DC-Wandler, der 12V auf 5V wandelt. An diesen werden wiederum 5V Lithium-Ionen-Lader angeschlossen, welche das laden entsprechender Akkus, wie zum Beispiel in Mobiltelefonen nachstellen sollen. Alle diese Verbraucher werden an die 12V-Schaltnetzteile angeschlossen.

Anders als bei Variante A wird hier nicht mit Lastprofilen verglichen. Zum einen, da es schwierig ist AC und DC Lastprofile zu vergleichen und zum anderen, da im Folgenden vielmehr das Konzept und die Auswirkungen der Netzteile auf den SEIG untersucht werden sollen. Daher sieht auch das Lastdiagramm des Testzyklus für Variante B etwas anders aus. Diese ist in Abbildung 34 zu sehen. In Tabelle 11 sind die einzelnen Schaltschritte mit Verbrauchern dokumentiert.



Abbildung 34 Lastdiagramm des Testzyklus für Netzteile 12 V

Alle Messungen werden in gleicher Weise durchgeführt wie bei Variante A im Abschnitt zuvor. Es wird der selbe Analysator für Drehstromnetze verwendet und es werden die sel-

t/ s	Leistung/ W	An/ Aus	Phase	Verbraucher
0	10	an	L3	Netzteil + LED
5	10	an	L2	Netzteil + LED
39	22	an	L1	Netzteil + DC/DC + Li-Ion Lader + TV
94	10	ab	L3	Netzteil + LED
98	10	ab	L2	Netzteil + LED
105	22	ab	L1	TV
110	10	ab	L1	Li-Ion
125	12	an	L1	TV
128	10	an	L2	LED
130	10	an	L3	LED
145	10	an	L1	Li-Ion

Tabelle 11 Schaltreihenfolge der Verbraucher für Test der Variante B

ben Größen aufgezeichnet. Der Aufbau der Kapitel, Art der Diagramme und Tabellen sind ähnlich, was der einfacheren Vergleichbarkeit dienen soll. Für weitere Informationen und Anmerkungen zur Messung und Messverfahren siehe ebenfalls die vorherigen Kapitel.

### 5.3.3. Auswertung der Messungen von Strangspannung, Frequenz und THD

Nachfolgend werden zuerst die Strangspannungen diskutiert. Die verketteten Spannungen sind vom Verlauf analog und werden daher nicht gesondert betrachtet. Anschließend wird die Veränderung der Frequenz beschrieben. Am Ende wird die THD etwas ausführlicher ausgewertet und auch die Oberwellen werden mit in diesem Kapitel untersucht.

Der hier betrachtete Testzyklus unterscheidet sich von dem bei Variante A. Eine Vergleichbarkeit ist also schwierig herzustellen. Am Ende können jedoch aussagekräftige Rückschlüsse gezogen werden.

**Auswertung Strangspannung** Im Diagramm in Abbildung 35 sind die Verläufe der Strangspnnungen dargestellt. Mit gepunkteten Linien über bzw. unter den gleichfarbigen soliden Linien werden die maximalen bzw. minimalen Werte der gemessenen Strangspannungen dargestellt. Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Strangspannungen sind in Tabelle 12 zu finden.

Nach dem ersten Maximum zu Beginn, welches durch den Leerlauf des SEIG verursacht wird, schaltet sich der ELC ein, der entsprechend Lasten zuschaltet. Hierdurch fallen alle Strangspannungen auf einen Wert von ca. 240 V. Zum Zeitpunkt t = 0 s wird die erste Last auf

Phase L3 zugeschaltet. Nach einer Verzögerungszeit  $t_v$ , die 5 s  $< t_{v,Nt} < 6$  s ist, ist erst eine Veränderung der Spannung im Diagramm zu erkennen. Dieser Effekt ist aus den Verhalten von Variante A nicht bekannt. Er ist damit zu begründen, dass das Netzteil sich erst einschaltet, nachdem es eine konstante Ausgangsspannung liefern kann und sich die Kondensatoren im Netzteil entsprechend aufgeladen haben. Durch diesen und weitere Verzögerungseffekte, wird eine zusätzliche Liste angegeben, in der die Zeiten der Spannungsänderungen und die Ursache für diese aufgeführt sind. Nur mit Hilfe der Tabelle 11 ist es nicht ausreichend dies bildlich zu erklären:

•	0 s	$\xrightarrow{t_{v,Nt}}$	Netzteil L3	$\xrightarrow{t_{v,l}}$	LED L3		
•	5 s	$\xrightarrow{t_{v,Nt}}$	Netzteil L2	$\stackrel{'}{\underset{v,l}{\underbrace{t_{v,l}}}}$	LED L2		
•	39 s	$\xrightarrow{t_{v,Nt}}$	Netzteil L1	$\stackrel{\prime}{}$	DC/DC	$\xrightarrow{t_{v,TV}}$	ΤV
•	125 s	$\xrightarrow{t_{v,TV}}$	TV	,		7	

mit:

 $5 \text{ s} < t_{v,Nt} < 6 \text{ s}$ : Zeitverzögerung Einschalten Netzteil  $1 \text{ s} < t_{v,l} < 5 \text{ s}$ : Zeitverzögerung Zuschalten Lasten am Netzteil  $7 \text{ s} < t_{v,TV} < 9 \text{ s}$ : Zeitverzögerung Einschalten des TVs

Tabelle 12 Extremwerte und Arithmetische Mittelwerte der Strangspannungen

$V1_{min}$	$V2_{min}$	$V3_{min}$	$V1_{av}$	$V2_{av}$	$V3_{av}$	$V1_{max}$	$V2_{max}$	$V3_{max}$
109,6	110,0	123,9	229,9	233,1	231,0	262,1	270,5	263,9

Tabelle 13 Extremwerte und Arithmetischer Mittelwert der Frequenz

$f_{min}$	$f_{av}$	$f_{max}$
48.99	49.26	49.95

Durch genannte Verzögerungen sinkt die Strangspannung nach Einschalten der Schaltnetzteile (also erst nach ca. 5 s) um 5 V. Direkt nachdem Abfall steigt die Strangspannung ohne Schalten des ELC wieder auf ihren ursprünglichen Wert. Die Schaltnetzteile selbst tragen also nicht zu einer dauerhaften Reduktion der Strangspannung bei. Erwähnenswert sind jedoch die Minimalwerte, die in Tabelle 12 dargestellt sind. Außer bei den Netzteilen selbst gibt es keinen stärkeren Ausschlag nach unten. Dies liegt vor allem daran, dass alle anderen Verbraucher direkt an den Netzteilen angeschlossen sind. Diese gleichen durch große Kondensatoren am Ausgang der Netzteile bereits Spannungsschwankungen durch Zuschalten aus. Dies ist bei Variante A nicht möglich.

Generell sind die Spannungsschwankungen deutlich geringer als bei Variante A. Dies hat jedoch keine große Aussagekraft, da die Lasten, welche insgesamt geschaltet werden deutlich geringer sind.





Nur zu zwei Zeitpunkten schaltet der ELC überhaupt Lasten ab um die Spannung zu halten. Dies ist jeweils nur bei maximaler Last nach 55 s und nach 142 s der Fall.

### Auswertung Frequenzverlauf

Der Frequenzverlauf ist in Abbildung 36 zu sehen. Wie auch bei Variante A, ist im Vergleich zum bereits beschriebenen Spannungsverlauf die Form des Frequenzverlaufes nahezu identisch. Wie zu erwarten war, sinkt folglich die Frequenz mit der Strangspannung und umgekehrt.

Extremwerte und der Arithmetische Mittelwert der Frequenz über den kompletten Zeitraum der Messung sind der Tabelle 13 zu entnehmen. Ergänzende oder neue Erkenntnisse sind im Vergleich zur Variante A nicht festzustellen. Da die Belastung des Generators geringer ausfällt als zuvor sind die Werte für die Frequenz etwas höher. Die Abweichungen der Extremwerte vom Mittelwert 49,26 Hz betragen -0,55% bzw. 1,4%.



Abbildung 36 Gemessene Frequenz und THDr der Variante B

### Auswertung THD

Zusätzlich zur Frequenz sind in Abbildung 36 auf der zweiten y-Achse die THDr-Werte für alle drei Strangspannungen abzulesen. Für weitere Infos zur THD siehe "Auswertung THD" im Kapitel 5.1.4. Wie auch bei den vorherigen Auswertungen zur THDr, unterscheidet sich die Verlaufsform der THDr mit dem Verlauf der Strangspannungen. Dafür gibt es andere Korrelationen, welche zuvor nicht so deutlich zu erkennen sind.

Mit zunehmender Last an den Schaltnetzteilen und damit auch sinkender Strangspannung, erhöht sich der Wert der THDr. Lediglich die zwei Peaks vom Schalten des ELC verhalten sich umgekehrt. Dies wurde schon zuvor festgestellt. Die Lasten an den Schaltnetzteilen scheinen sich negativ auf die Qualität der Spannung, also die THD auszuwirken. Diese Annahme wird auch durch die allgemein höheren Werte der THD bestätigt. Die Werte der THDr bewegen sich zwischen 7,5% und 13,5%. Die Werte bei Variante A mit Controller betrugen zwischen 5% und 13% bei wesentlich größeren Lasten. Auch hier sind Werte über 10% während des Testbetriebes hörbar durch Geräuschabgabe des SEIG.

Wie ebenfalls bereits festgestellt, verschlechtert sich die Spannungsqualität durch Lasten mit Induktivitäten oder verbauter Elektronik, indem die THD steigt. Dies trifft auch auf Schaltnetzteile zu.

Die THD wird bei Variante A nahezu ausschließlich durch 3. und 5. Harmonische verursacht. Bei Verwendung größerer Schaltnetzteile in Variante B ist die Bandbreite jedoch deutlich größer. Abbildung 37 zeigt die ungeraden Oberschwingungen ab der 3. bis zur 27. für Variante B. Die Schaltnetzteile verursachen folglich Oberschwingungen, welche die Strangspannung deutlich beeinflussen. Selbst bei der 15. Harmonischen liegt der Wert von L1 und L2 noch bei 1% der Grundschwingung.



Abbildung 37 Anteile der Oberschwingungen in Relation zur Grundschwingung bei Variante B

Um diese ungewollten Rückwirkungen auf den Generator zu vermeiden, könnten Netzfilter eingesetzt werden, welche die Oberschwingungen herausfiltern. Da diese Filter meist Tiefpässe sind, die mit Hilfe von Drosseln und Kondensatoren aufgebaut sind, ist es jedoch fraglich, wie sich diese wiederum auf den SEIG selbst auswirken. Wie aus dem Kapitel 3 bekannt, kann das Verhalten des SEIG durch Drosseln und Kondensatoren deutlich beeinflusst werden. Für einen dauerhaften Einsatz der Variante B sollten folglich weitere Überprüfungen stattfinden, ob der Einsatz von Netzfiltern und damit generell das Verwenden von Schaltnetzteilen sinnvoll ist.

## 6. Mögliche Erweiterungen der Varianten A und B

In diesem Kapitel sollen mögliche Erweiterungen und zukünftige Entwicklungen der beiden Varianten A und B beschrieben werden. Die hier vorgestellten Testsysteme und Varianten sind rein zu Testzwecken gebaut worden. Um die Entwicklung eines Prototypen oder gar eine Serienproduktion auf Grundlage der hier vorgeschlagenen Varianten aufzubauen, sollen im folgenden einige Erweiterungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Folgendes wird für zukünftige Entwicklungen vorgeschlagen:

- Display f
  ür Arduino hinzuf
  ügen zur Anzeige von Schaltstatus, Spannungen, Warnmeldungen u. a. Diese sind bereits f
  ür weniger als 10€ erh
  ältlich. Alternativ: LEDs parallel zu den Relais verbauen um deren Schaltstatus anzuzeigen.
- Einstellung der maximalen und minimalen Strangspannung zum Schalten der Lasten des Controllers mit einem Potentiometer oder Tasten als zusätzliche Peripherie. Zur Kontrolle der korrekten Einstellung wird ein Display benötigt, siehe Punkt oben
- Automatische Einstellung der Verzögerungszeit im Programmcode durch Begrenzung der Schaltvorgänge pro Sekunde, statt konstanter Zeitvorgabe. Auf diese Weise wird zunächst direkt geschaltet ohne Verzögerung und anschließend beginnt die Verzögerungszeit zu laufen. Dies könnte durch Veränderung der Schrittvariablen wie folgt detektiert und umgesetzt werden:

```
if (HelperResLoad_previous != HelperResLoad) {
  counter++;
  unsigned long currentMillis = millis();
}
```

Dies konnte nicht während der Bearbeitungsphase getestet werden und dient nur als Vorschlag.

- Andere Lastwiderstände testen und Verkapselung für diese entwerfen
- Strom und/ oder Frequenzmessung als zusätzliche Überwachung/ Anzeige zum Controller hinzufügen. Dies ist nicht zur Spannungshaltung nötig, sondern rein informativ, z. B. zur Anzeige auf einem externem Display
- Platine weiterentwickeln, wie in 4.4 beschrieben
- Lower Budget Controller, der nur auf einer Phase misst, aber mit Frequenz um Last der anderen beiden Phasen zu approximieren.

## 7. Investitionskosten

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Investitionskosten für die getesteten und im Labor aufgebauten Komponenten einzeln aufgeführt, berechnet und analysiert. Als Grundlage dienen die Kosten der eingesetzten Komponenten. Es werden anschließend die Marktpreise für jeweils günstigere Komponenten anderer Hersteller für eine Kostenbetrachtung verwendet. Dies gilt nur für die Investitionskosten des ELC, da nur dieser mit teilweise bereits vorhandenen Teilen gebaut wurde. Für die der Kondensatorbox und das Paketes für Variante B wurden direkt möglichst günstige Komponenten ausgewählt.

### 7.1. ELC

In Abbildung 38 sind die Investitionskosten für einen ELC wie er im Labor aufgebaut wurde gegeben. Insgesamt ergeben sich Kosten von 53,26€ für einen kompletten ELC. Die Ausgaben mit den Herstellern, welche auf den Abbildungen 19 und 21 zu sehen sind, beliefen sich auf ca. 72,67€. Wie bereits erwähnt, würden für einen zukünftigen Bau günstigere Komponenten verwendet, weshalb auch im Folgenden mit 53,26€ weiter gerechnet wird.

Der größte Kostenpunkt sind dabei die Lastwiderstände. Für diese gilt, je höher die Nennleistung der Widerstände, desto teurer sind sie. Es werden bislang ausschließlich Widerstände mit 50 W verwendet. Daher lassen sich diese Kosten noch reduzieren. Zum einen können größere Widerstandswerte durch Widerstände mit geringerer Leistung ersetzt werden, zum anderen könnte getestet werden, ob generell Lastwiderstände mit niedrigeren Nennleistungen ausprobiert werden können, wenn diese in Wasser getaucht werden, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben.

Der zweitgrößte Kostenpunkt sind die Relais. Zum Schalten werden insgesamt neun Stück benötigt. Eine Alternative zu einzelnen Relais sind Relaiskarten, die speziell für den Einsatz mit Controller-Boards konstruiert sind. Diese sind jedoch nicht bedeutend günstiger und stellen einen Mehraufwand an Verdrahtung dar.

Da sehr viele Nachbauten mit Atmega 328 des Arduino Uno existieren und die Funktionalität auch selbst auf einer Platine erstellt werden kann, wird ein günstigerer Preis für einen solchen Aufbau unter Investitionskosten des Controller-Boards angegeben, als beim verwendeten Board. Dieses ist ebenfalls ein Nachbau und funktioniert problemlos. Hierdurch lassen sich die Kosten des drittgrößten Punktes deutlich reduzieren.

### 7.2. Kondensatorbox

In Abbildung 39 sind die Investitionskosten für eine Kondensatorbox gegeben. Insgesamt ergeben sich Kosten von 31,25€ pro Box mit drei in Dreieck verschalteten Kondensatoren und



Abbildung 38 Investitionskosten für einen ELC

einer Feinsicherung pro Phase.

Die hier aufgeführte Option ist die günstigste. Für zusätzliche Sicherheit und Funktionalität kann die Box noch erweitert werden. Ein vierpoliger FI-Schutzschalter (RCD) kostet ca. 25€und würde bei Fehlerströmen den Generator komplett trennen, sodass dieser ohne Kondensatorerregung frei dreht und das System komplett spannungslos ist. Für eine manuelle Abschaltung können Schalter hinzugefügt werden. Die zusätzlichen Kosten für diese belaufen sich auf ca. 3,50€.



Abbildung 39 Investitionskosten für eine Kondensatorbox

### 7.3. Zusatzkosten System-Variante B

Da bei Variante B zusätzliche Komponenten benötigt werden, entstehen zusätzliche Kosten. Diese setzen sich aus den Schaltnetzteilen und DC/DC-Wandler zusammen, wie in Tabelle 14 zu sehen. Es wird angenommen, dass ein Wasserrad drei Haushalte versorgt, von denen jeweils einer pro Netzteil versorgt werden soll. Insgesamt ergeben sich so pro Haushalt zusätzliche Kosten von 28,95€pro Haushalt. Außerdem gibt es die Überlegung die Variante B als ein komplettes Paket mit verschiedenen Verbrauchern anzubieten, da 12 V-Verbraucher kommerziell weniger häufig vertrieben werden als 230 V-Verbraucher. Ein Vorschlag für ein Basispaket enthält drei LED-Lampen, einen TV und mehrere Stecker und Buchsen zum Anschluss eigener 12 V-Verbraucher. Die Kosten für ein solches Paket liegen bei ca. 80€, siehe Tabelle 14. Insgesamt würde also ein komplettes System mit Variante B 108,95€ohne Kondensatorbox, ELC, Generator oder Wasserrad kosten.

Kosten/ € Anzahl/ Gesamt/ € Haushalt 1 Schaltnetzteil 13.95 13.95 3 DC/DC Wandler 12V->5V (KFZ) 5,00 15,00 Zusatzkosten pro Haushalt 28,95 5,00 3 15,00 LED Lampen TV 50,00 1 50.00 (KFZ) 12V Buchsen, Stecker 15,00 1 15,00 Paketkosten pro Haushalt 80,00 Summe 108,95

Tabelle 14 Zusatzkosten und Paketkosten für System Variante B

### 7.4. Gesamtkosten des Systems und der Varianten A und B

Als Grundlage zur Ermittlung der gesamten Kosten werden die Ergebnisse von Eisner [5] verwendet. Demnach belaufen sich die gesamten Kosten für einen Prototypen-Aufbau eines Wasserrades in Nepal auf 971,87\$. Darunter sind die Einzelkosten für Bleche, Schrauben, Muttern, Stahl, Beton, Antriebsstrang, Generator, Getriebe, Arbeitskosten und sonstige Kosten. Da diese Kosten alle in US-Dollar angegeben sind, werden die in den vorherigen Unterkapiteln angegebenen Kosten in US-Dollar umgerechnet. Die Umrechnung erfolgt mit einem Umrechnungsfaktor von 1:1,16 (gerundet nach aktuellem Umrechnungskurs)[29]. Hieraus ergibt sich für die Variante A die Gesamtkostenverteilung in Tabelle 15, für Variante B in Tabelle 16. Damit ist Variante B rund 100\$ teurer als Variante A. Hinzu kommen je nach Bedarf noch die Paketkosten von Variante B mit ca. 93\$. Für Variante A wird voraus gesetzt, dass die elektronischen Verbraucher teilweise bereits vorhanden sind oder zusätzlich gekauft werden müssen. Diese Kosten sind nicht enthalten, tragen jedoch auch nicht zur Stromer-

zeugung bei.

Tabelle 15 Gesamtkosten Variante A

ELC mit Lastwiderständen	61,78
Kondensatorbox	36,25
Wasserrad inkl. Generator	971,87
	Kosten/ \$

Tabelle 16 Gesamtkosten Variante B

	Kosten/ \$
Wasserrad inkl. Generator	971,87
Kondensatorbox	36,25
ELC mit Lastwiderständen	61,78
Zusatzkosten Variante B	100,75
Summe	1170,65

### 7.4.1. Energiepreise

Im Folgenden wird ein Ansatz geliefert, wie hoch die tatsächlichen Kosten über die Jahre ausfallen. Aus den Daten von Eisner [7], kann für einen Haushalt, für den ein System mit Wasserrad in Frage kommt, ein Stromverbrauch von 330 Wh/d bis 1000 Wh/d ermittelt werden. Für die folgende Rechnung wird für insgesamt drei Haushalte ein durchschnittlicher Bedarf von 2000 Wh/d angenommen. In einem Jahr ist das ein Verbrauch von  $2000 \text{ Wh/d} \cdot 365 = 730 \text{ kW h}$ . In folgender Tabelle 17 werden mit diesem Wert die Kosten pro kWh angegeben, mit der Annahme, dass keine zusätzlichen Kosten für Wartung etc. entstehen. Für Systeme mit Wasserrad kann nach [30] mit Laufzeiten bis zu 50 Jahren gerechnet werden. Es werden die Kosten von Variante A zur Berechnung verwendet.

Bei einem Strompreis von ca. 0,0344\$/ kWh in Nepal mit monatlichen Bereitstellungskosten von 0,688\$/ kWh [31][32], lohnt sich das hier vorgestellte System nach etwa 40 Jahren. Hierbei muss jedoch erwähnt werden, dass in vielen ländlichen Gebieten bislang kein Zugang zu Strom vorhanden ist und das vorgestellte System dennoch mit den Preisen in den Städten über lange Sicht konkurrieren kann. Hinzu kommt ein Zusatznutzen durch warmes Wasser, welcher nicht mit in der Rechnung enthalten ist. Ebenfalls nicht berücksichtigt ist, dass durch die maximale Ausnutzung des Systems theoretisch  $180 \text{ W} \cdot 24 \text{ h} = 4320 \text{ W} \text{ h}$  nutzbare Energie pro Tag zur Verfügung stehen würden. Das heißt, dass das System eher günstiger als teurer ist, als hier approximiert. Mit einer Vergrößerung der gesamten Anlage steigt der Preis

Jahre	\$/ kWh
5	0,293
10	0,147
20	0,073
30	0,049
40	0,037
50	0,029

Tabelle 17 Stromkosten in \$/ kWh für verschieden Laufzeiten bis 50 Jahre

jedoch nicht linear an, sondern die Kosten pro Watt installierter Leistung sinken. Auch hierdurch könnten die Kosten pro kWh noch einmal gesenkt werden.

## 8. Bewertung, Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1. Bewertung des Systems und der Varianten A und B

Auf Grundlage aller vorangegangenen Kapitel und der darin bereits enthaltenen technischen Bewertungen wie optimale Betriebspunkte oder Wirkungsgrade, werden in diesem Kapitel abschließende Bewertungen hinsichtlich Investitionskosten, Alltagstauglichkeit, Umsetzbarkeit, Lebensdauer und Erweiterbarkeit gegeben.

#### Investitionskosten

Die Investitionskosten sind genauer in Kapitel 7 aufgeführt. Wie dort zu entnehmen ist, sind die Investitionskosten für Variante A günstiger als für Variante B. Wird also rein nach Kosten entschieden, so ist Variante A im Vorteil. Der große Vorteil von Variante B wird unter dem Punkt Erweiterbarkeit (s. u.) deutlich.

#### Alltagstauglichkeit

Das beschriebene System ist vollkommen alltagstauglich. Durch Controller oder andere Komponenten gibt es keinerlei Hindernisse oder besondere Vorschriften, welche z. B. über die von Verbundnetzen hinausgehen. Dies gilt dabei eher für Variante A. Da bei Variante B auf 12 V-DC gesetzt wird, müssen auch entsprechende elektrische Verbraucher verwendet werden. Zu diesem Zweck wurden auch in Kapitel 7 die Kosten für ein Starter-Paket für Variante B mit angegeben. Auch wenn die Verfügbarkeit für 12 V-DC Systeme beispielsweise durch Camping und Kraftfahrzeug (KFZ)-Anwendungen gegeben ist, so ist es vermutlich für Anwender doch einfacher auf die bekannten 230 V-AC Verbraucher zurückzugreifen.

### Umsetzbarkeit

Grundsätzlich sind beide Varianten durch den Low-Tech-Ansatz des ELC sehr einfach umzusetzen und aufzubauen. Der Verdrahtungsaufwand für Variante B ist durch die Schaltnetzteile eventuell etwas höher. Für weitere, geplante Umsetzungen siehe Unterkapitel 8.3.

#### Lebensdauer

Über die Lebensdauer des Systems und deren Varianten kann nur spekuliert werden, da keine Langzeittests oder Erfahrungen vorliegen. Wie bereits in 7 erwähnt, wird für Wasserkraftanlagen mit Laufzeiten von bis zu 50 Jahren gerechnet[30]. Ob dies auch auf das hier vorliegende System zutrifft und ob der Controller über diesen Zeitraum operieren kann ist unbekannt, da diese Technologien erst seit wenigen Jahren etabliert sind.

Grundsätzlich wirken sich Oberschwingungen nicht nur negativ auf Verbraucher, sondern auch auf den Generator aus. Deshalb ist in Bezug auf die Varianten, die Variante A hinsichtlich der Lebensdauer als besser zu bewerten. Dies lässt sich jedoch nicht quantifizieren.

#### Erweiterbarkeit

Verschiedene, technische Möglichkeiten zu Erweiterungen innerhalb des hier vorgestellten Systems befinden sich in Kapitel 4.4 und 6. In Bezug auf eine externe Erweiterbarkeit durch weitere Komponenten, liegen die Vorteile eindeutig bei Variante B. Da mit Variante A zwar die Spannungen und die Frequenz in einem bestimmten Bereich gehalten werden können, jedoch nicht mit weiteren Netzen synchronisierbar sind, würden hier zusätzliche Komponenten benötigt, welche sehr kostenintensiv sind. Bei einem DC-System hingegen können mit Hilfe von Ladereglern und Batterien sehr einfach weitere Komponenten zur Stromerzeugung und Verbrauch hinzugefügt werden und auch Systeme gekoppelt werden. Dies können z. B. PV-Anlagen oder Mikro-Windturbinen sein. Wird eine solche Kopplung oder Erweiterung in Betracht gezogen, so sollte direkt Variante B installiert werden. Da Variante B im Grunde jedoch nur zusätzliche Netzteile enthält, kann auch Variante A mit Netzteilen oder generell mit Gleichrichtern zu Variante B umgebaut- oder an genannte Komponenten angeschlossen werden.

### 8.2. Abschließende Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass mit geringen Investitionskosten ein robuster und funktionierender Electronic Load Controller (ELC) entwickelt und gebaut werden kann, der die Funktion eines Lastmanagements für vorgestellte Systeme übernehmen kann. Die Integration erfolgt direkt mit dem Generator, sodass es für Nutzer des Systems keinerlei Einschränkungen gibt und die Integration sehr einfach ist. Nach Einstellung des Controllers operiert dieser vollkommen automatisiert und er funktioniert auch nach Ausfall/ Wiedereinschalten des Gesamtsystems. Die Grundfunktionalität ist die Spannungshaltung eines Inselsystems mit Wasserrad und Selbsterregtem Asynchrongenerator. Gleichzeitig wird die Varianz der Frequenz verringert und die Spannungsqualität durch Verringerung der THD gesteigert. Die Spannung bleibt auch nach ausgiebigen Messungen und Tests in hohen Lastbereichen stabil in einem bestimmten, vorgegebenen Bereich. Dabei arbeitet der ELC mit einfachen Lastwiderständen und Relais zum Schalten. Somit kann er als Low-Tech bezeichnet werden. Um dies zu verwirklichen wurde das komplette System im Labor aufgebaut und getestet, um den Anforderungen in Entwicklungsländern, wie zum Beispiel Nepal, gerecht zu werden. Einzelkomponenten wurden sorgfältig ausgesucht, nachdem diese ebenfalls praktisch getestet wurden. Außerdem bieten die Lastwiderstände den Zusatznutzen, dass diese Wasser erwärmen können, sodass weitere Energie in den Haushalten eingespart werden kann.

Es wurde eine Übersicht der Investitionskosten gegeben, in der gezeigt wurde, dass ein Gesamtsystem samt Implementierung vor Ort ab etwa 1070€ kostet. Die Kosten für einen ELC samt Lastwiderständen belaufen sich auf 53,26€.

Am Ende wurde gezeigt, dass es mit Variante A und Variante B zwei unterschiedliche Möglichkeiten gibt, das System für die Benutzung auszulegen. Stichpunktartig wurden Erweiterungsmöglichkeiten genannt, welche zeigen, dass die Varianten weiter optimiert und verbessert werden können. Dies sind zum Beispiel Erweiterungen zur einfacheren Nutzung und Bedienbarkeit. Variante B kann um ein komplettes Erneuerbare Energien Paket ergänzt werden, indem beispielsweise Batterien, Laderegler, PV oder Micro-Windturbinen zum 12V-DC System hinzugefügt werden.

### 8.3. Zukunftsplanung, weiteres Vorgehen

Es wird vorgeschlagen, dass in vier Schritten das System bis zum finalen Einsatz eingesetzt, erweitert und getestet werden soll. Diese Schritt können zum Beispiel die folgenden sein:

- 1. Testen an einer Forschungsstation mit Wasserrad der TUM mit den im Rahmen dieser Arbeit gebauten Komponenten
- 2. Prototypenentwicklung mit eventuellen Weiterentwicklungen wie in 6 vorgeschlagen und Erfahrungen aus dem Test
- 3. Bau des Prototypen
- 4. Einsatz des/ der ersten Prototypen vor Ort, in Nepal

## Literaturverzeichnis

- [1] The World Bank. DataBank. World Development Indicators. Access to electricity. http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=2& series=EG.ELC.ACCS.RU.ZS&country=, 2018. [Online; Zugriff 15.08.2018].
- [2] Kate Louw, Beatrice Conradie, Mark Howells, and Marcus Dekenah. Determinants of electricity demand for newly electrified low-income african households. *Energy Policy*, 36(8):2812 – 2818, 2008.
- [3] Molly Lipscomb, A. Mushfiq Mobarak, and Tania Barham. Development effects of electrification: Evidence from the topographic placement of hydropower plants in brazil. American Economic Journal: Applied Economics, 5(2):200–231, April 2013.
- [4] Paul Cook. Infrastructure, rural electrification and development. Energy for Sustainable Development, 15(3):304 – 313, 2011. Special issue on off-grid electrification in developing countries.
- [5] Johannes Eisner. A Low-Tech Water Wheel System for the Off-Grid Electricity Supply in Developing Countries by the Example of Nepal: Feasibility, Implementation & Evaluation. Master's thesis, Technische Universität München, München, Juni 2018.
- [6] Lukas Geß. Design of a low-tech water wheel for the electrical power supply in Nepal. Semester thesis, Technische Universität München, München, Juli 2017.
- [7] Johannes Eisner. Analysis of the Energy Demand for Designing Off-Grid Energy Systems for Developing Countries Based on the Example of Nepal. Semester thesis, Technische Universität München, München, März 2017.
- [8] Andre Klöckner. Weiterentwicklung eines Versuchsaufbaus mit neuen Untersuchungen in Theorie und Praxis für selbsterregte Asynchrongeneratoren im Inselbetrieb. Forschungspraxis, Technische Universität München, München, Februar 2018.
- [9] Mathias Bottheim. Eigenbau eines Datenloggers zur Analyse des Stromnetzes. Forschungspraxis, Technische Universität München, München, Juni 2017.
- [10] Philipp Hench. Wirkungsgrad einer Asynchronmaschine als Generator in Inselsystemen. Bachelorthesis, Technische Universität München, München, März 2017.
- [11] R. Fischer. Elektrische Maschinen. Hanser eLibrary. Hanser, 2013.

- [12] A. Binder. *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten.* Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [13] E. Bolte. Elektrische Maschinen: Grundlagen Magnetfelder, Wicklungen, Asynchronmaschinen, Synchronmaschinen, Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen. Springer, 2012.
- [14] Jean-Marc Chapallaz, Jacques Dos Ghali, Peter Eichenberger, and Gerhard Fischer. *Manual on induction motors used as generators.* Springer, 1992.
- [15] O. Ojo. Minimum airgap flux linkage requirement for self-excitation in stand-alone induction generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10(3):484–492, Sept 1995.
- [16] S. Kumar, S. Pradhan, and R. N. Sahu. Excitation capacitance requirements of three phase self excited induction generator for windmill application. In 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, pages 365–370, April 2013.
- [17] Aly A Abdel Aziz, Ragi A Hamdy, Ayman S Abdel-Khalik, and Mohamed Y Abdel Fattah. Investigation of a three-phase self-excited induction generator feeding single-phase loads. In *Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG),* 2017 11th IEEE International Conference on, pages 358–363. IEEE, 2017.
- [18] TS Weerakoo, RPS Chandrasena, and A Arulampalam. Novel c2r-r configuration for micro-hydro plants used in islanded systems. *Journal of Energy and Environment*, 1(1), 2013.
- [19] Hui Zhong, Baodong Wang, Chao Wu, and Jing Wang. Performance analysis of threephase self-excited induction generator under single-phase load. In *Electrical Machines* and Systems (ICEMS), 2016 19th International Conference on, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [20] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Handbuch Lastmanagement. https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads\_ Dateien/strom/1408\_Lastmanagement\_Handbuch.pdf, 2012. [Online; Zugriff 11.09.2018].
- [21] N. Smith. Motors as Generators for Micro Hydro Power. Practical Action handbook. Practical Action Publishing, 2008.
- [22] J. Chan and W. Lubitz. Electronic load controller (elc) design and simulation for remote rural communities: A powerhouse elc compatible with household distributed-elcs

in nepal. In 2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), pages 360–367, Oct 2016.

- [23] K. Fuest and P. Döring. Elektrische Maschinen und Antriebe. Viewegs Fachbücher der Technik. Vieweg, 2004.
- [24] Andreas Kremser. Elektrische Maschinen und Antriebe. Springer, 2013.
- [25] JB Ekanayake. Induction generators for small hydro schemes. Power Engineering Journal, 16(2):61–67, 2002.
- [26] Dandan Ma. Self-excited induction generator: a study based on nonlinear dynamic methods. 2012.
- [27] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. LWF-Merkblatt 20: Scheitholz – Produktion, Lagerung, Kennzahlen. http://www.lwf.bayern.de/mam/ cms04/service/dateien/mb20-scheitholz-bf.pdf, 2014. [Online; Zugriff 31.08.2018].
- [28] C. Gerthsen and D. Meschede. *Gerthsen Physik*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [29] finanzen.net GmbH. Dollarkurs (Euro Dollar) (EUR-USD). https://www. finanzen.net/devisen/dollarkurs, 2018. [Online; Zugriff 11.09.2018].
- [30] J. Giesecke, S. Heimerl, and E. Mosonyi. *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb*. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [31] finanzen.net GmbH. Nepalesische Rupie Dollar (NPR in USD). https://www. finanzen.net/waehrungsrechner/nepalesische-rupie\_us-dollar, 2018. [Online; Zugriff 11.09.2018].
- [32] SAARC Energy Centre (SEC). Electricity Tariff Rates of Nepal Electricity Authority. http://www.saarcenergy.org/wp-content/uploads/2016/03/ Nepal\_Tariff.pdf, 2018. [Online; Zugriff 11.09.2018].

# A. Anhang

A.1. Stromlaufplan







1	2	3	4	2	9	2	8	6	10	11	12		13	14	15	16	17	
																L	r F	
۸.																	2A-c/	
								12								2	2H-C/	
. /								L3									28-c/	
								z								2 2		
		11	τı	11	τı	15	21	15 <del>g</del>	77		<u>٤٦</u>	51		E1	<b>ЕП</b>		28-c/	
	N		K2 (6-F4)	<u>K</u> 3	<u>K</u> 4 (6-F12)			ζ5 K6 (7-14	K7 (7-F8)				58 2	P 68	K10 (8-F4)			
			R2	] R3	R4 (4.7)		ی ۳۵	R6	R8				R10	R11	R12 4.7k			
Ш			z	1		+	z	z	z		+	z	z	z				
									- pec					File:				
							Y	sistive Dumminy	Lodus					Folio: 4/9				










### A.2. Einfache Methode zur Approximierung der Mindestkapazitäten

# Auslegung der Kondensatoren für die selbsterregte Asynchronmaschine im Inselbetrieb

Es gibt einige Wege die Kapazität für die Kondensatoren für die selbsterregte Asynchronmaschine im Inselbetrieb zu bestimmen. In dieser kurzen Übersicht mit Beispielen soll die einfachste Möglichkeit dargestellt werden. Hierzu werden im Vergleich zu anderen Verfahren ausschließlich die Angaben des Typenschildes und zwei Rechenschritte benötigt.

#### Voraussetzungen:

Die Angaben vom Typenschild der Maschine sind bekannt/ können abgelesen werden.

#### Folgende Werte werden benötigt:

- f: Frequenz, die der Generator erzeugen soll
- $U_{\triangle}$  oder  $U_Y$ : Eine der Nennspannungen des Generators.
- $I_{\triangle}$  oder  $I_Y$ : Einer der Nennströme des Generators.
- $\varphi$ : Phasenwinkel der Maschine. Angabe auf Typenschild ist  $cos\varphi$

#### Verschaltungsmöglichkeiten

- Fall 1: Generator in Stern, Kondensatoren in Dreieck
- Fall 2: Generator in Stern, Kondensatoren in Stern
- Fall 3: Generator in Dreieck, Kondensatoren in C-2C

Berechnung der Kapazität C in Abhängigkeit der Blindleistung Q der Maschine

$$\frac{C}{Q} = \frac{1}{6\pi \cdot f \cdot U^2} \tag{A.1}$$

mit

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_Y \cdot I_Y \cdot \sin(\varphi) \tag{A.2}$$

Setzt man nun die Werte für den jeweiligen Generator/ das jeweilige Verbundnetz ein, ergeben sich Konstanten für die jeweiligen Fälle. Sind die Konstanten bestimmt, kann nach Bestimmung er Blindleistung *Q* durch einfachen Dreisatz in einem einzigen weiteren Schritt der benötigte Wert der Kondensatoren bestimmt werden.

#### Beispiel

Wir gehen vom europäischen Verbundnetz aus, weshalb die f = 50 Hz Angaben des Generators, dessen Typenschild in Abbildung 40 dargestellt ist, verwendet werden. Für Fall 1 und Fall 3 bedeutet das ( $k_{13}$ : Konstante für Fall 1 und 3)

$$\frac{C}{Q} = \frac{1}{6\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot (400 \text{ V})^2}$$

$$= 6,631 \frac{\text{nF}}{\text{var}}$$

$$= k_{13}$$
(A.3)

Für Fall 2 bedeutet das ( $k_2$ : Konstante für Fall 2)

$$\frac{C}{Q} = \frac{1}{6\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot (230 \text{ V})^2}$$

$$= 20,057 \frac{\text{nF}}{\text{var}}$$

$$= k_2$$
(A.4)

Blindleistung Q des Generators bestimmen

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_Y \cdot I_Y \cdot \sin(\varphi) \tag{A.5}$$

mit

$$\varphi = \arccos(0, 64) \tag{A.6}$$
$$= 50,208^{\circ}$$

ergibt sich

$$Q = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 1,06 \text{ A} \cdot \sin(50,208^{\circ})$$
(A.7)  
= 564,29 var

Daraus folgt mit

$$C = k \cdot Q \tag{A.8}$$

Fall 1 und 3:

$$C = k_{13} \cdot Q$$
(A.9)  
= 6,631  $\frac{nF}{var} \cdot 564,29 var$   
= 3,742 µF

Fall 2:

$$C = k_{13} \cdot Q$$
 (A.10)  
= 20,057  $\frac{nF}{var} \cdot 564,29 var$   
= 11,318 µF



Abbildung 40 Typenschild der Maschine, welche als Asynchrongenerator verwendet wird

Wichtig: Die Kondensatoren sollten in der Praxis etwas größer ausgelegt werden als berechnet, ansonsten fällt die Spannung unter Last zu stark ab. Bei Belastung kann auch das Zuschalten weiterer Kapazitäten oder das verwenden von Drosselspulen sinnvoll sein.

Detaillierte Herleitungen zu den Formeln, alternative Berechnungsmethoden, konkrete Quellenangaben und tiefere Einblicke in die Theorie der selbsterregten Asynchronmaschine werden im Bericht meiner Forschungspraxis näher erläutert.

Erstellt im Rahmen der Forschungspraxis im Jahr 2018 ©Andre Klöckner

# A.3. Datenblatt Drehmomentsensor

#### Quelle: ETH messtechnik gmbh

https://www.eth-messtechnik.de/\_datenblaetter/de/DRVL.pdf



#### Datenblatt

Drehmomentaufnehmer

# DRVL

Messbereiche von 0,02 bis 20.000 Nm mit Drehzahl- bzw. Drehwinkelmessung







#### **Merkmale DRVL**

- wartungsfrei
- kontaktlose Signalübertragung
- eingebauter Messverstärker
- universell einsetzbar
- kompakte Abmessungen
- geringes Massenträgheitsmoment
- Drehzahlmessung (optional)
- Drehwinkelmessung (optional)

- erweiterte EMV-Festigkeit
- einstellbarer Ausgangspegel von Drehzahlund Winkelsignal (5 V - 24 V)
- erweiteter Drehzahlbereich für Drehzahlund Winkelmessung
- Frequenzausgang 10 kHz ± 5 kHz (RS422)
- großer Eingangsspannungsbereich (10 28,8 V)
- optional 0,05 % Linearitätsfehler

Der Aufnehmer eignet sich aufgrund der kompakten Abmessungen und vielfältiger Montagemöglichkeiten für den Einsatz im Labor und für die Industrieumgebung.

Die berührungslose Übertragung von Speisespannung und Messsignal ermöglicht einen verschleißarmen und wartungsfreien Dauerbetrieb. Der integrierte Messverstärker liefert ein analoges, galvanisch getrenntes Ausgangssignal von 0  $\pm$  10 V bzw. 10 kHz  $\pm$  5 kHz bei einer Speisespannung von 10 - 28,8 V DC.

Die Standardversion wird mit glatten Wellenenden geliefert. Verschiedene Typen (siehe Tabelle) sind als Sonderausführung mit Passfedern lieferbar.

Technische Änderungen vorbehalten

Datenblatt DRVL 210917

#### **Elektrische Daten DRVL**

Speisespannung	10 - 28,8 V DC				
Stromaufnahme	bei Ub 12 V ca. 180 mA (Schaltwandler 2,2 W)				
Signalanstieg 10-90 %	2 ms (optional 400 µs)				
Grenzfrequenz -3 dB	200 Hz (optional 1 kHz)				
	Spannungsausgang:	Frequenzausga	ng:		
Ausgangssignal:	0 ± 10 V	10 kHz ± 5 kHz	(RS422)		
Auflösung:	16 bit ≙ 0,38 mV	16 bit ≙ 0,19 m	Hz		
Aussteuerbereich:	± 11 V	± 6,3 KHz			
Innenwiderstand:	100 Ω	_			
Restwelligkeit:	< 100 mVss	_			
Fehler für Nichtlinearität/Max. Messfehler (bez. auf den Er DRVL: DRVL-I bis DRVL-VI:	ndwert) 0,15 % (optional 0,1 %) 0,1 % (optional 0,05 %)	0,15 % (option 0,1 % (option	nal 0,1 % ) nal 0,05 % )		
Fehler für Hysterese:	0,1 %	0,1 %			
Nullpunktabweichung:	≤ 50 mV	≤ 50 Hz			
Arbeitstemperaturbereich:	0 - 60 °C				
Temperaturkomp. Bereich:	5 - 45 °C				
Temperaturfehler Nullpunkt: Empfindlichkeit:	0,02 % / К 0,01 % / К				
Mech. Überlastbarkeit:	100 %				
Schutzart:	IP 40 (DIN 40050)				
Anschluss:	12pol Einbaustecker				
Störaussendung Grundnorm EN55011 Grenzwertklasse B	Frequenzbereich 150 kHz - 6 GHz				
Störempfindlichkeit Grundnorm EN61000-4-2:2009 Entladung statischer Elektrizität (ESD) EN61000-4-2:2009 Entladung statischer Elektrizität (ESD) EN61000-4-3:2009 Elektromagnetische Felder EN61000-4-4:2009 Schnelle Transienten (Burst) EN61000-4-5:2005 Stoßspannungen (Surge) EN61000-4-6:2009 Leitungsgeführte HF-Störgrößen EN61000-4-8:2005 Magnetfelder mit energietechnischen A: Abweichung der Messausgänge während der Prüfung <	Prüfschärfe 4 kV 4 kV 10 V/m 2 kV 1 kV 10 V/m Frequenzen 30 A/m \$ 0,3 % vom Endbereich	Koppelung Direkt Indirekt Indirekt Direkt Indirekt Indirekt	Ergebnis A A A B A A A		
B: Abweichung der Messausgänge während der Prüfung >	0,3 % vom Endbereich				

	Option Drehzahl (n)	Option Drehwinkel (w)				
Drehzahl:	≤ 37.000 1/min*	≤ 20.000 1/min*				
Ausgang:	TTL bzw. über Spannung an Pin 5 V < U < 24 V					
Impedanz:	22 Ω	22 Ω				
I <sub>max</sub> :	20 mA	20 mA				
Impulse / Umdrehung:	60	2 x 360				
Auflösung:		1°				
Phasenversatz:		Kanal A 90° vorauseilend bei Rechtslauf der Antriebsseite				
* Die angegebenen Werte gelten bei ETH-Messkabel ≤ 10 m, die maximal zulässige Drehzahl des Sensors ist zu beachten.						

ETH messtechnik gmbh hagstrasse 10 D-74417 gschwend germany tel. +49 (0)7972-9310-0 vertrieb@eth-messtechnik.de www.eth-messtechnik.de

#### Mechanische Abmessungen DRVL



Тур	DRVL	DR	VL-I	DRVL-Ib	DRVL-II	DRVL-III	DRVL-IV	DRVL-V	DRVL-VI
Mess-	0,02	0,05	2	1	5	50	500	2000	10.000
bereiche:	0,05	0,1		2	10	100	1000	3000	15.000
(Nm)	0,10	0,2		5	20	150	1300	4000	20.000
		0,5		10	30	200	1500	5000	
		1			50	300			
Abmessungen			(and	ere Messberei	che auf Anfrag	e; Allgemeinto	leranzen nach	DIN 2768-m)	
L (mm)	82	89	95	110	145	170	270	320	355
B (mm)	32	2	28	36	42	56	88	105	168
B1 (mm)	24	(→	LK)	$(\rightarrow LK)$	(→ LK)	$(\rightarrow LK)$	$(\rightarrow LK)$	$(\rightarrow LK)$	
H (mm)	47	5	54	58	58	73	104	121	185
H1 (mm)	14	1	L4	18	21	28	44	52,5	84
H2 (mm)	22	(→	LK)	$(\rightarrow LK)$					
Ø D1 g6 (mm)	3	8	8	10	15	26	45	70	110
Ø D2 g6 (mm)	3	5	6	10	15	26	45	70	110
Ø D3-0,1 (mm)	15	2	27	32	38	54	80		
Ø LK ± 0,1 (mm)	$(\rightarrow B1/H2)$	3	32	38	46	65	98		
L1	63	e	52	68	79	72	84	95	121
L2	7,5	10	14	18	30	45	85	110	115
L3	7,5	11	14	18	30	45	85	110	115
L4	67	6	56	72	83	78	90		
A1	50	2	10	56	60	42	46	75	91
A2	24	2	22	24	32	40	70	85	138
M1	M2,5 x 5 tief	M3 x	5 tief	M3 x 6 tief	M3 x 6 tief	M4 x 8 tief	M6 x 12 tief	M8 x 16 tief	M10x16 tief
M2	M2,5 x 5 tief	M3 x	6 tief	M3 x 6 tief	M3 x 6 tief	M4 x 8 tief	M6 x 12 tief		
P (DIN 6885) optional				2xA3x3x14	2xA5x5x25	2xA8x7x40	4xA14x9x80	4xA20x12x100	
Gewicht ca. (g)	200	1	70	340	600	1300	4500	11.500	33.000
n max (1/min)	20.000	37.	000	26.000	19.000	13.500	7900	6300	4000

ETH messtechnik gmbh hagstrasse 10 D-74417 gschwend germany tel. +49 (0)7972-9310-0 vertrieb@eth-messtechnik.de www.eth-messtechnik.de

#### **Technische Daten DRVL**

Тур	Messbereich (Nm)	Federkonstante C (Nm/rad)	Massenträgheits- moment J (g•cm <sup>2</sup> )	Zulässige Axiallast (N) *	Zulässige Radiallast (N) *
DRVL	0,02	16	7	35	30
	0,05	16	7	35	30
	0,10	16	7	35	30
DRVL-I	0,05	20	10	105	2
	0,1	35	10	140	3
	0,2	35	10	140	3
	0,5	45	10	160	4
	1	90	10	210	7
	2	135	10	210	13
DRVL-Ib	1	255	30	630	10
	2	255	30	630	10
	5	715	30	725	25
	10	1320	30	725	50
DRVL-II	5	960	100	1200	15
	10	2115	100	1300	30
	20	3955	100	1300	60
	30	5340	105	1300	100
	50	6700	105	1300	155
DRVL-III	50	17 x 10 <sup>3</sup>	775	1800	125
	100	30 x 10 <sup>3</sup>	785	1800	215
	150	45 x 10 <sup>3</sup>	800	1800	340
	200	54 x 10 <sup>3</sup>	810	1800	450
	300	67 x 10 <sup>3</sup>	840	1800	650
DRVL-IV	500	260 x 10 <sup>3</sup>	9935	4150	650
	1000	387 x 10 <sup>3</sup>	10.140	4150	1275
	1300	429 x 10 <sup>3</sup>	10.285	4150	1650
	1500	449 x 10 <sup>3</sup>	10.380	4150	1700
DRVL-V	2000	1,45 x 10 <sup>6</sup>	63 x 10 <sup>3</sup>	4800	1950
	3000	1,85 x 10 <sup>6</sup>	64 x 10 <sup>3</sup>	4800	2930
	4000	2,10 x 10 <sup>6</sup>	64 x 10 <sup>3</sup>	4800	3880
	5000	2,30 x 10 <sup>6</sup>	65 x 10 <sup>3</sup>	4800	4000
DRVL-VI	10.000	8,20 x 10 <sup>6</sup>	440 x 10 <sup>3</sup>	11.800	8895
	15.000	10,45 x 10 <sup>6</sup>	448 x 10 <sup>3</sup>	11.800	9830
	20.000	11,80 x 10 <sup>6</sup>	546 x 10 <sup>3</sup>	11.800	9830

\*Die Werte für Axial- und Radiallast gelten für das nicht-fixierte Gehäuse

#### Bestellschema



#### erhältliches Zubehör

Auswertegeräte: GMV2 ValueMasterBase Messkabel Kupplungen

ETH messtechnik gmbh hagstrasse 10 D-74417 gschwend germany tel. +49 (0)7972-9310-0 vertrieb@eth-messtechnik.de www.eth-messtechnik.de

# A.4. Belegung Sensorleitung des Drehmomentsensors

#### Quelle: ETH messtechnik gmbh

https://www.eth-messtechnik.de/downloads/DRVL-bedienungsanleitung.
pdf

#### 8.2 DRVL-n

Drehmomentaufnehmer mit Option Drehzahl (n) Steckverbinder: 12-polig Messkabel mit freiem Leitungsende Typ AK12.3F bzw. AK12.3DF (doppelt abgeschirmt)

Pin	Belegung	AK12.3 F Farbe	AK12.3 DF Farbe
А	Frequenz Ausgang	schwarz	schwarz
В	NC	rot	rot
С	Moment Ausgang	braun	braun
D	Moment Masse	weiß	weiß
Е	Versorgung + Drehzahl Masse	gelb	gelb
F	Versorgung 9-28 V	lila	rosa
G	Drehzahl Ausgang	grün	grün/braun
н	Speicherchip *nur mit ETH-Auswertegerät	rosa	lila
J	Messbereit	grau	grün/weiß
К	Kalibriereingang	grau/rosa	grau/rosa
L	Frequenz Ausgang invertiert	rot/blau	rot/blau
М	Spannungsreferenz Drehzahl	blau	blau



(Anschluss am Aufnehmer von oben gesehen)

PIN D (Moment Masse) und PIN E (Versorgung Masse) sind intern galvanisch getrennt; bei Bedarf an der Speisequelle (nicht am Aufnehmer) brücken.

#### Externe EMV Beschaltung

Zwischen den Pins C - D an der Auswertung kann zur Vermeidung von Leitungsgebundenen Störungen ein Keramikkondensator 100 nF / 50 V eingelötet werden.

## A.5. Messergebnisse Wirkungsgradbestimmung

18 Messerg	Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine A bei konstanter Spannung							
	$\frac{P_{el}}{W}$	$\frac{R_{230V}}{\Omega}$	$\frac{R_{Mess}}{\Omega}$	$rac{U_{St,Mess}}{V}$	$rac{I_{St,mess}}{A}$	$rac{n_{Mess}}{1/min}$	$rac{M_{mess}}{Nm}$	$\eta$
S0	200	795	795	230,7	0,291	1650	2,010	57,99
S1	180	882	882	229,8	0,265	1620	1,914	56,26
S2	160	992	992	230,9	0,243	1591	1,798	56,19
S3	140	1134	1134	230,6	0,207	1570	1,651	52,76
S4	120	1323	1323	230,2	0,179	1515	1,512	51,53
S5	100	1587	1587	230,6	0,148	1518	1,362	47,29
S6	80	1984	1984	230,9	0,117	1495	1,224	42,29
S7	60	2645	2645	230,2	0,089	1469	1,086	36,79
S8	40	3968	3200	230,0	0,074	1456	1,003	33,39
S9	20	7935	5700	230,9	0,053	1433	0,845	28,95
S10	16		10173	230,5	0,028	1410	0,705	18,60
Leer	0			250,0	0,000	1458	0,753	0,00

 Tabelle 18 Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine A bei konstanter Spannung

	, ,							
	$rac{P_{el}}{W}$	$rac{R_{230V}}{\Omega}$	$\frac{R_{Mess}}{\Omega}$	$\frac{U_{St,Mess}}{V}$	$rac{I_{St,mess}}{A}$	$rac{n_{Mess}}{1/min}$	$rac{M_{mess}}{{\sf N}{\sf m}}$	$\eta$
S0	200	795	795	140,5	0,181	1458	0,902	55,40
S1	180	882	882	159,0	0,184	1458	1,034	55,59
S2	160	992	992	173,8	0,181	1458	1,119	55,24
S3	140	1134	1134	185,1	0,165	1458	1,141	52,59
S4	120	1323	1323	195,9	0,151	1458	1,141	50,94
S5	100	1587	1587	206,1	0,132	1458	1,131	47,26
S6	80	1984	1984	215,7	0,112	1458	1,095	43,35
S7	60	2645	2645	224,6	0,087	1458	1,038	36,99
S8	40	3968	3200	229,2	0,074	1458	1,003	33,23
S9	20	7935	5700	238,5	0,043	1458	0,905	22,27
S10	16		10173	248,2	0,025	1458	0,813	15,00

 Tabelle 19 Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine A bei konstanter Drehzahl

Tabelle 20 Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine B bei konstanter Spannung

	$\frac{P_{el}}{W}$	$\frac{R_{230V}}{\Omega}$	$\frac{R_{Mess}}{\Omega}$	$rac{U_{St,Mess}}{V}$	$rac{I_{St,mess}}{A}$	$rac{n_{Mess}}{1/min}$	$rac{M_{mess}}{Nm}$	$\eta$
U<220	278	300	300	166,0	0,558	908	4,360	67,03
S0	250	635	635	219,5	0,353	948	4,100	57,11
S1	222	715	715	227,0	0,314	960	4,030	52,78
S2	194	818	818	230,8	0,280	963	3,860	49,80
S3	166	956	956	230,5	0,241	956	3,570	46,63
S4	139	1142	1142	230,1	0,205	948	3,250	43,86
S5	111	1430	1430	230,5	0,162	943	2,960	38,32
S6	83	1912	1912	230,3	0,121	937	2,670	31,91
S7	56	2834	2834	230,1	0,083	931	2,382	24,67
S8	27	5878	5878	230,1	0,042	926	2,100	14,24
Leer	0			249,4	0,000	921	2,123	0,00

0		00						
	$\frac{P_{el}}{W}$	$rac{R_{230V}}{\Omega}$	$rac{R_{Mess}}{\Omega}$	$\frac{U_{St,Mess}}{V}$	$\frac{I_{St,mess}}{A}$	$rac{n_{Mess}}{1/min}$	$rac{M_{mess}}{Nm}$	$\eta$
U<220	278	300	300	162,0	0,547	907	4,110	68,10
S0	250	635	635	207,2	0,324	924	3,729	55,82
S1	222	715	715	211,7	0,298	928	3,623	53,75
S2	194	818	818	216,4	0,265	932	3,490	50,51
S3	166	956	956	221,0	0,232	937	3,351	46,78
S4	139	1142	1142	226,0	0,199	942	3,210	42,61
S5	111	1430	1430	230,7	0,162	947	3,022	37,41
S6	83	1912	1912	235,4	0,124	953	2,840	30,90
S7	56	2834	2834	240,3	0,086	957	2,640	23,43
S8	27	5878	5878	245,3	0,045	963	2,430	13,51

Tabelle 21 Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine B bei konstanter Drehzahl

Tabelle 22 Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine C bei konstanter Spannung

	$\frac{P_{el}}{W}$	$rac{R_{230V}}{\Omega}$	$\left  \begin{array}{c} \frac{R_{Mess}}{\Omega} \end{array} \right $	$\left  \begin{array}{c} U_{St,Mess} \\ V \end{array} \right $	$\frac{I_{St,mess}}{A}$	$rac{n_{Mess}}{1/min}$	$\frac{M_{mess}}{Nm}$	$\eta$
S0	176	850	850	220,3	0,266	860	4,650	41,98
S1	157	1011	1011	228,0	0,238	856	4,668	38,90
S2	140	1134	1134	230,5	0,205	847	4,500	35,52
S3	123	1290	1290	230,0	0,182	840	4,310	33,12
S4	105	1511	1511	230,2	0,152	828	4,040	29,97
S5	88	1803	1803	230,8	0,128	820	3,837	26,90
S6	70	2267	2267	230,5	0,102	812	3,630	22,85
S7	53	3023	3023	229,9	0,077	803	3,360	18,80
S8	35	4534	4700	230,3	0,050	794	3,130	13,27
S9	18	9069	10173	229,8	0,021	780	2,780	6,38
Leer	0			243,0	0,000	782	2,760	0,00

23 Messerg	3 Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine C bei konstanter Drenzani								
	$rac{P_{el}}{W}$	$rac{R_{230V}}{\Omega}$	$rac{R_{Mess}}{\Omega}$	$\frac{U_{St,Mess}}{V}$	$\frac{I_{St,mess}}{A}$	$rac{n_{Mess}}{1/min}$	$rac{M_{mess}}{Nm}$	$\eta$	
S0	176	850	850	220,3	0,266	860	4,650	41,98	
S1	157	1011	1011	228,0	0,238	856	4,668	38,90	
S2	140	1134	1134	230,5	0,205	847	4,500	35,52	
S3	123	1290	1290	230,0	0,182	840	4,310	33,12	
S4	105	1511	1511	230,2	0,152	828	4,040	29,97	
S5	88	1803	1803	230,8	0,128	820	3,837	26,90	
S6	70	2267	2267	230,5	0,102	812	3,630	22,85	
S7	53	3023	3023	229,9	0,077	803	3,360	18,80	
S8	35	4534	4700	230,3	0,050	794	3,130	13,27	
S9	18	9069	10173	229,8	0,021	780	2,780	6,38	
Leer	0			243,0	0,000	782	2,760	0,00	

 Tabelle 23 Messergebnisse Wirkungsgrad Maschine C bei konstanter Drehzahl

A.6. Wassererwärmung durch Lastwiderstände

Tabelle 24 Messergebnisse Erwärmung Wasser durch Lastwiderstände

t/ min	T(35W)/ °C	T(53W)/ °C	T(72W)/ °C
0	23,4	23,5	23,7
5	24,4	25,3	25,4
10	26,8	28,5	31,1
15	29,1	31,9	36,6
20	31,1	34,8	40,4
25	32,7	37,8	44,4
30	34,6	40,3	47,7
35	36,3	42,8	50,5
40	37,9	45,1	52,7
45	39,3	47,3	55,0
50	40,5	49,4	57,0
55	41,9	51,0	58,6
60	43,2	52,5	59,9
65	44,3	53,8	61,1
70	45,3	55,1	62,3
75	46,2	56,3	62,9
80	47,2	57,1	63,6
85	47,9	57,9	63,6
90	48,3	58,6	65,1
95	48,8	59,2	65,1
100	49,2	59,7	66,7
105	50,0	60,3	66,7
110	50,1	60,6	67,8
115	50,3	61,1	67,8
120	50,5	61,4	68,4

#### A.7. Arduino-Code des Controllers

```
1 // Konstanten:
2 const long interval = 500;
                                        // Schaltverzögerung bzw T/2
      Zeitkonstante (PT_2 Überschwingen, Hoch und runterschalten)
3
4 // Variablen:
5 int analogA0 = 0;
                                       // Analogwert Eingang A0
6 int analogA1 = 0;
                                        // Analogwert Eingang Al
7 int analogA2 = 0;
                                        // Analogwert Eingang A2
8 float avgVoltL1 = 0.00;
                                        // Durchschnittwert Analogeingang A0
       zur Bildung der Spannung L1
9 float avgVoltL2 = 0.00;
10 float avgVoltL3 = 0.00;
11 float right_voltageL1 =0.00;
12 float right_voltageL2 =0.00;
13 float right_voltageL3 =0.00;
14 int HelperResLoadL1 = 0;
15 int HelperResLoadL2 = 0;
16 int HelperResLoadL3 = 0;
17 unsigned long previousMillisL1 = 0; // store last time from L1
      switching
18 unsigned long previousMillisL2 = 0; // store last time from L2
     switching
19 unsigned long previousMillisL3 = 0; // store last time from L3
      switching
20
21 // the setup routine runs once when you press reset:
22 void setup() {
23
24 // initialize serial communication at 9600 bits per second:
25 Serial.begin(9600);
26
27 // Referenzspannung von Extern (verbunden mit 3,3 V von Board):
28 analogReference(EXTERNAL);
29
30 // PinMode festlegen, Output für Transistoren/ Relais
31 pinMode(11, OUTPUT);
32 pinMode(10, OUTPUT);
33 pinMode(9, OUTPUT);
34 pinMode(8, OUTPUT);
35 pinMode(7, OUTPUT);
36 pinMode(6, OUTPUT);
37 pinMode(5, OUTPUT);
38 pinMode(4, OUTPUT);
39 pinMode(3, OUTPUT);
40 pinMode(2, OUTPUT);
41 }
42
43 // the loop routine runs over and over again forever:
44 void loop() {
45
```

46 //max width for inline comments etc, for horizontal printout

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

47 //

```
48 //Spannungsmessung:
49
50 // L1:
51 avgVoltL1 = 0.00;
                                                       // set average
     voltage value to O
52 for (int i = 0; i < 500; i++) {
                                                       // make an average
     with for-loop over 500 readings
53 analogA0 = analogRead(A0);
                                                     // read analog input
     AO
54 avgVoltL1 = avgVoltL1 + analogA0;
                                                     // add voltage value
     in every loop
55 }
56 avgVoltL1 = avgVoltL1/500;
                                                      // average value,
     dividing by number of loops
57 // Serial.println(avgVoltL1);
                                                        // show value via
     serial print on computer
58 right_voltageL1 = avgVoltL1*0.349 + 43,222;
                                                      // formula,
     calibration, calculate true voltage
59 Serial.println(right_voltageL1);
                                                       // show value via
     serial print on computer
60
61 // L2:
62 avgVoltL2 = 0.00;
                                                      // set average
  voltage value to O
63 for (int j = 0; j < 500; j++) {
                                                     // make an average
     with for-loop over 500 readings
64 analogA1 = analogRead(A1);
                                                     // read analog input
     A1
                                                     // add voltage value
65 avgVoltL2 = avgVoltL2 + analogA1;
     in every loop
66 }
67 avgVoltL2 = avgVoltL2/500;
                                                     // average value,
     dividing by number of loops
68 // Serial.println(avgVoltL2);
                                                        // show the value
      via serial print on computer
69 right_voltageL2 = avgVoltL2*0.2274 + 31,543; // formula,
     calibration, calculate true voltage
70 Serial.println(right_voltageL2);
                                                     // show value via
     serial print on computer
71
72 // L3:
73 avgVoltL3 = 0.00;
                                                       // set average
     voltage value to 0
74 for (int k = 0; k < 500; k++) {
                                                     // make an average
     with for loop over 500 readings
75 analogA2 = analogRead(A2);
                                                     // read analog input
     A2
```

```
76 avgVoltL3 = avgVoltL3 + analogA2;
                                                 // add voltage value
      in every loop
 77 }
 78 avgVoltL3 = avgVoltL3/500;
                                                   // average value,
      dividing by number of loops
79 // Serial.println(avgVoltL3);
                                                     // show the value
      via serial print on computer
80 right_voltageL3 = avgVoltL3*0.2283 + 32,977; // formula,
      calibration, calculate true voltage
81 Serial.println(right_voltageL3);
                                                    // show value of
      voltage
82
83 //
      _____
84 // Schalten von L1:
85 // Schaltmodi: Speicherung als integer in HelperResLoadL1 (Nr vor
      jeweiliger Leistung)
86 // Sortiert nach Leistung:
87
88 // P(230V)/W R/kOhm Konfiguration
                                               Pin(s)
89 // 1: 11,255
                   4,7 4,7
                                              11
90 // 2: 24,045
                   2,2 2,2
                                              9
                   1,499 2,2 || 4,7
                                         9 & 11
91 // 3: 35,301
92 // 4: 44,083
                   1,2 1,2
                                              8
93 // 5: 55,339
                   0,956 1,2 || 4,7
                                             8 & 11
94 // 6: 68,129
95 // 7: 79,384
                   0,776 1,2 || 2,2
                                              8&9
                   0,666 1,2 || 2,2 || 4,7 8 & 9 & 11
96
97 // Wert von HelperResLoad (=Schrittnummer) ausgeben:
98 Serial.print("Wert_Helper_Variable_L1:_");
99 Serial.println(HelperResLoadL1);
100
101 // Zur Stabilisierung nach/ vor Schaltvorgängen (um Überschwingen zu
      verhindern), Verzögerung mit millis():
102 unsigned long currentMillisUpL1 = millis();
103
104 if (currentMillisUpL1 - previousMillisL1 >= interval) {
105 previousMillisL1 = currentMillisUpL1; // Letzte Zeit als
      Relais geschaltet wurden, speichern
106
107 //Schaltmodus 0:
108 if (right_voltageL1 <= 245 && HelperResLoadL1 == 0) {
109 Serial.println("Schaltmodus_L1:_0");
110 digitalWrite(8, LOW);
111 digitalWrite(9, LOW);
112 digitalWrite(11, LOW);
113 }
114
115 //Schaltmodus 1:
116 else if (right_voltageL1 > 245 && HelperResLoadL1 == 0) {
117 HelperResLoadL1 = 1;
```

```
118 Serial.println("Schaltmodus_L1:__1");
119 digitalWrite(8, LOW);
120 digitalWrite(9, LOW);
121 digitalWrite(11, HIGH);
122 }
123
124 //Schaltmodus 2:
125 else if (right_voltageL1 > 245 && HelperResLoadL1 == 1) {
126 HelperResLoadL1 = 2;
127 Serial.println("Schaltmodus_L1:_2");
128 digitalWrite(8, LOW);
129 digitalWrite(9, HIGH);
130 digitalWrite(11, LOW);
131 }
132
133 //Schaltmodus 3:
134 else if (right_voltageL1 > 245 && HelperResLoadL1 == 2) {
135 HelperResLoadL1 = 3;
136 Serial.println("Schaltmodus_L1:_3");
137 digitalWrite(8, LOW);
138 digitalWrite(9, HIGH);
139 digitalWrite(11, HIGH);
140 }
141
142 //Schaltmodus 4:
143 else if (right_voltageL1 > 245 && HelperResLoadL1 == 3) {
144 HelperResLoadL1 = 4;
145 digitalWrite(8, HIGH);
146 digitalWrite(9, LOW);
147 digitalWrite(11, LOW);
148 }
149
150 //Schaltmodus 5:
151 else if (right_voltageL1 > 245 && HelperResLoadL1 == 4) {
152 HelperResLoadL1 = 5;
153 digitalWrite(8, HIGH);
154 digitalWrite(9, LOW);
155 digitalWrite(11, HIGH);
156 }
157
158 //Schaltmodus 6:
159 else if (right_voltageL1 > 245 && HelperResLoadL1 == 5) {
160 HelperResLoadL1 = 6;
161 digitalWrite(8, HIGH);
162 digitalWrite(9, HIGH);
163 digitalWrite(11, LOW);
164 }
165
166 //Schaltmodus 7:
167 else if (right_voltageL1 > 245 && HelperResLoadL1 == 6) {
168 HelperResLoadL1 = 7;
169 digitalWrite(8, HIGH);
```

```
170 digitalWrite(9, HIGH);
171 digitalWrite(11, HIGH);
172 }
173 }
174
175 if (right_voltageL1 < 220) {</pre>
176 HelperResLoadL1--;
177 }
178
179 if (HelperResLoadL1 < 0) {</pre>
180 HelperResLoadL1 = 0;
181 }
182
183 //
       _____
184 // Schalten von L2:
185 // Schaltmodi: Speicherung als integer in HelperResLoadL2 (Nr vor
       jeweiliger Leistung)
186 // Sortiert nach Leistung:
187
188 // P(230V)/W R/kOhm Konfiguration Pin(s)
                   4,7 4,7
189 // 1: 11,255
                                                7
                     2,2
190 // 2: 24,045
                            2,2
                                                6
191 // 3: 35,301
                                               6 & 7
                    1,499 2,2 || 4,7
192 // 4: 44,083
                    1,2
                           1,2
                                                5
                    0,956 1,2 || 4,7
193 // 5: 55,339
                                                5 & 7
194 // 6: 68,129
                    0,776 1,2 || 2,2
                                               5 & 6
195 // 7: 79,384
                    0,666 1,2 || 2,2 || 4,7 5 & 6 & 7
196
197 Serial.print("Wert_Helper_Variable_L2:_");
198 Serial.println(HelperResLoadL2);
199
200 unsigned long currentMillisUpL2 = millis();
201
202 if (currentMillisUpL2 - previousMillisL2 >= interval) {
203 previousMillisL2 = currentMillisUpL2;
204
205 //Schaltmodus 0:
206 if (right_voltageL2 <= 245 && HelperResLoadL2 == 0) {
207 Serial.println("Schaltmodus_L2:_0");
208 digitalWrite(5, LOW);
209 digitalWrite(6, LOW);
210 digitalWrite(7, LOW);
211 }
212
213 //Schaltmodus 1:
214 if (right_voltageL2 > 245 && HelperResLoadL2 == 0) {
215 HelperResLoadL2 = 1;
216 digitalWrite(5, LOW);
217 digitalWrite(6, LOW);
218 digitalWrite(7, HIGH);
```

```
219 }
220
221 //Schaltmodus 2:
222 else if (right_voltageL2 > 245 && HelperResLoadL2 == 1) {
223 HelperResLoadL2 = 2;
224 digitalWrite(5, LOW);
225 digitalWrite(6, HIGH);
226 digitalWrite(7, LOW);
227 }
228
229 //Schaltmodus 3:
230 else if (right_voltageL2 > 245 && HelperResLoadL2 == 2) {
231 HelperResLoadL2 = 3;
232 digitalWrite(5, LOW);
233 digitalWrite(6, HIGH);
234 digitalWrite(7, HIGH);
235 }
236
237 //Schaltmodus 4:
238 else if (right_voltageL2 > 245 && HelperResLoadL2 == 3) {
239 HelperResLoadL2 = 4;
240 digitalWrite(5, HIGH);
241 digitalWrite(6, LOW);
242 digitalWrite(7, LOW);
243 }
244
245 //Schaltmodus 5:
246 else if (right_voltageL2 > 245 && HelperResLoadL2 == 4) {
247 HelperResLoadL2 = 5;
248 digitalWrite(5, HIGH);
249 digitalWrite(6, LOW);
250 digitalWrite(7, HIGH);
251 }
252
253 //Schaltmodus 6:
254 else if (right_voltageL2 > 245 && HelperResLoadL2 == 5) {
255 HelperResLoadL2 = 6;
256 digitalWrite(5, HIGH);
257 digitalWrite(6, HIGH);
258 digitalWrite(7, LOW);
259 }
260
261 //Schaltmodus 7:
262 else if (right_voltageL2 > 245 && HelperResLoadL2 == 6) {
263 HelperResLoadL2 = 7;
264 digitalWrite(5, HIGH);
265 digitalWrite(6, HIGH);
266 digitalWrite(7, HIGH);
267 }
268 }
269
270 if (right_voltageL2 < 220) {
```

```
271 HelperResLoadL2--;
272 }
273
274 if (HelperResLoadL2 < 0) {
275 HelperResLoadL2 = 0;
276 }
277
278 //
      279 // Schalten von L3:
280 // Schaltmodi: Speicherung als integer in HelperResLoadL3 (Nr vor
      jeweiliger Leistung)
281 // Sortiert nach Leistung:
282
283 // P(230V)/W R/kOhm Konfiguration
                                                Pin(s)
284 // 1: 11,255
                   4,7 4,7
                                               2
285 // 2: 24,045
                   2,2
                          2,2
                                               3
                                              3 & 2
286 // 3: 35,301
                   1,499 2,2 || 4,7
287 // 4: 44,083
                   1,2
                          1,2
                                               4
288 // 5: 55,339
                   0,956 1,2 || 4,7
                                              4 & 2
289 // 6: 68,129
                   0,776 1,2 || 2,2
                                              4 & 3
                   0,666 1,2 || 2,2 || 4,7 4 & 3 & 2
290 // 7: 79,384
291
292 Serial.print ("Wert_Helper_Variable_L3:..");
293 Serial.println(HelperResLoadL3);
294
295 unsigned long currentMillisUpL3 = millis();
296
297 if (currentMillisUpL3 - previousMillisL3 >= interval) {
298 previousMillisL3 = currentMillisUpL3;
299
300 //Schaltmodus 0:
301 if (right_voltageL3 <= 245 && HelperResLoadL3 == 0) {
302 Serial.println("Schaltmodus,L3:.0");
303 digitalWrite(4, LOW);
304 digitalWrite(3, LOW);
305 digitalWrite(2, LOW);
306 }
307
308 //Schaltmodus 1:
309 if (right_voltageL3 > 245 && HelperResLoadL3 == 0) {
310 HelperResLoadL3 = 1;
311 digitalWrite(4, LOW);
312 digitalWrite(3, LOW);
313 digitalWrite(2, HIGH);
314 }
315
316 //Schaltmodus 2:
317 else if (right_voltageL3 > 245 && HelperResLoadL3 == 1) {
318 HelperResLoadL3 = 2;
319 digitalWrite(4, LOW);
```

```
320 digitalWrite(3, HIGH);
321 digitalWrite(2, LOW);
322 }
323
324 //Schaltmodus 3:
325 else if (right_voltageL3 > 245 && HelperResLoadL3 == 2) {
326 HelperResLoadL3 = 3;
327 digitalWrite(4, LOW);
328 digitalWrite(3, HIGH);
329 digitalWrite(2, HIGH);
330 }
331
332 //Schaltmodus 4:
333 else if (right_voltageL3 > 245 && HelperResLoadL3 == 3) {
334 HelperResLoadL3 = 4;
335 digitalWrite(4, HIGH);
336 digitalWrite(3, LOW);
337 digitalWrite(2, LOW);
338 }
339
340 //Schaltmodus 5:
341 else if (right_voltageL3 > 245 && HelperResLoadL3 == 4) {
342 HelperResLoadL3 = 5;
343 digitalWrite(4, HIGH);
344 digitalWrite(3, LOW);
345 digitalWrite(2, HIGH);
346 }
347
348 //Schaltmodus 6:
349 else if (right_voltageL3 > 245 && HelperResLoadL3 == 5) {
350 HelperResLoadL3 = 6;
351 digitalWrite(4, HIGH);
352 digitalWrite(3, HIGH);
353 digitalWrite(2, LOW);
354 }
355
356 //Schaltmodus 7:
357 else if (right_voltageL3 > 245 && HelperResLoadL3 == 6) {
358 HelperResLoadL3 = 7;
359 digitalWrite(4, HIGH);
360 digitalWrite(3, HIGH);
361 digitalWrite(2, HIGH);
362 }
363 }
364
365 if (right_voltageL3 < 220) {
366 HelperResLoadL3--;
367 }
368
369 if (HelperResLoadL3 < 0) {
370 HelperResLoadL3 = 0;
371 }
```

372 373 }