

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Roman Galiardt

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung und Herstellung einer mobilen Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung für den industriellen Einsatz

Stichworte

Drehstrom, Leistung, Spannung, Messeinrichtung, Messtechnik, Datenspeicherung, Mikrokontroller, Arduino, Schaltplan, Industrie 4.0., Kosten, Richtlinien, Programmcode

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Entwicklung und Herstellung einer mobilen Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung im industriellen Einsatz. Darin werden theoretische Grundlagen der Elektrotechnik erklärt, um die Messvorgänge zu verstehen. Für die Realisierung des Vorhabens, wird zuvor ein Konzept entwickelt, wonach die Herstellung der Leistungsmesseinrichtung erfolgt. Hierzu sollen die VDI-Richtlinien beachtet werden, damit Unfälle vermieden und der richtige Umgang mit der Einrichtung gewährleistet wird. Zur Datenauswertung wird ein Programmcode geschrieben, der im Arduino Mega zur Datenausgabe Anwendung findet. Die Bedienung sowie der Aufbau der Einrichtung werden einfach beschrieben und im Laborbetrieb mit anderem Leistungsmesser verglichen. Die gesamte Arbeit schließt mit einem Fazit und einem Ausblick ab.

Name of Student

Roman Galiardt

Title of the paper

Development and manufacturing of mobile three-phase-power-measurement device for the industrial commitment.

Keywords

Three-phase, power, voltage, measuring device, data storage, microcontroller, Arduino, industry 4.0, circuit diagram, energy costs, guidelines, program code

Abstract

This work includes the development and manufacture of a mobile three-phase power measurement device for industrial use. This explains the theoretical fundamentals of electrical engineering in order to understand the measuring procedures. A concept is developed, according to which the power measuring device is manufactured. The VDI guidelines should be observed in order to avoid accidents. For data analysis, a program code is written which is used in the Arduino Mega application. The operation and the structure of the device are simply described and compared with a different power meter. The entire work concludes with a conclusion and an outlook.

Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit begleitet, unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonderer Dank gilt Herrn Dipl. Ing Reinhard Breuer, der sehr viel Zeit während dieser Arbeit mit mir verbracht hatte und immer mit Tat und Rat zur Seite stand. So hat Herr Breuer immer eine helfende Hand gehabt und blieb noch an der HAW Hamburg, wenn es draußen schon lange dunkel war. So konnte ich von Herrn Breuer durch seine lange Berufserfahrung einiges an Fertigkeiten dazulernen, wofür ich ihm sehr dankbar bin. Ich hoffe in Zukunft mit Herrn Breuer weiter zusammen arbeiten zu dürfen und Wünsche ihm und seiner Familie alles Gute.

Daneben gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Ing. Ralf Hendrych, der mich während der Arbeit mit seinem enormen Fachwissen unterstützt und betreut hat, sowie für seine Zeit und Geduld, die er zur Korrektur dieser Abschlussarbeit aufwendete.

Ganz besonders möchte ich an dieser Stelle meiner Ehefrau danken, die mir während der schwierigen Phasen zur Seite stand und an besonders langen Nächten liebevoll umsorgte, auch wenn sie allerhand mit unserem Sohn zu tun hatte.

Meiner Mutter und meiner Oma danke ich für die fürsorgliche und finanzielle Unterstützung, ohne die ich diese Bachelorarbeit niemals hätte anfertigen können.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Danksagung	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	x
Abkürzungsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 <i>Motivation</i>	1
1.2 <i>Ziel der Arbeit</i>	2
1.3 <i>Problemstellung der Arbeit</i>	2
1.4 <i>Aufbau der Arbeit</i>	3
2 Stand der Technik	4
2.1 <i>Mobile Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung</i>	4
2.2 <i>Umsatzentwicklung in der Messtechnik</i>	5
2.3 <i>Marktanalyse und Marktpreise</i>	6
2.4 <i>Marktanbieter</i>	6
2.4.1 <i>ROHDE & SCHWARZ</i>	7
2.4.2 <i>PCE</i>	10
2.4.3 <i>FLUKE</i>	12
2.4.4 <i>AMPROBE</i>	14
2.4.5 <i>Gossen Metrawatt</i>	16
3 Theoretische Grundlagen	18
3.1 <i>Grundlagen der Messgrößen</i>	18
3.1.1 <i>Strom, Spannung, Widerstand und Leistung</i>	18
3.1.2 <i>Wechselstrom und Gleichstrom</i>	19
3.1.3 <i>Effektivwert und Scheitelwert</i>	20
3.1.4 <i>Frequenz</i>	20
3.1.5 <i>Drehstromerzeuger</i>	21
3.1.6 <i>Verkettung von Sternschaltung und Dreieckschaltung auf</i>	22
Verbraucherseite	22
3.1.7 <i>Phasenverschiebung</i>	22
3.1.8 <i>Scheinleistung</i>	23
3.1.9 <i>Wirkleistung</i>	23
3.1.10 <i>Blindleistung</i>	24
3.1.11 <i>Leistungsfaktoren</i>	25
3.1.12 <i>Störgrößen im Netz</i>	25

3.2	<i>Grundlagen der Messtechnik</i>	26
3.2.1	Leistungsmessumformer	27
3.2.2	Schaltungsarten.....	28
3.2.3	Leistungsmessung.....	28
3.2.4	Stromwandler	29
3.2.5	Spannungswandler	30
3.2.6	Messkategorien	31
3.2.7	Arbeiten an elektrischen Anlagen	32
3.2.8	IP-Schutzarten.....	32
4	Entwicklung der Leistungsmesseinrichtung	33
4.1	<i>Konzeptentwicklung</i>	33
4.1.1	Anforderungsliste.....	34
4.1.2	3-A-Prinzip.....	35
4.1.3	Das Analog-Konzept.....	36
4.1.4	Das Digital-Konzept.....	37
4.1.5	Das Analog-Digital-Konzept.....	38
4.2	<i>Entwicklung, Schaltplan und Layout</i>	39
4.3	<i>Verwendete Komponenten</i>	39
4.3.1	Software	39
4.3.2	Stromwandler	40
4.3.3	Spannungswandler	40
4.3.4	Arduino Mega	41
4.3.5	Liquid-Crystal-Display(LCD)	41
4.3.6	SD-Card-Modul.....	42
4.3.7	SD-Card	42
4.3.8	Sub-D-Stecker	42
4.3.9	Key-Pad(Bedienfeld).....	43
4.3.10	LiPo-Akku	43
4.3.11	Gehäuse nach IP-Schutzart-Klassifizierung	44
4.3.12	UI-Interface.....	45
4.3.13	Messkarte.....	49
4.3.14	Arduino-Shield	55
4.3.15	Spannungsteiler(SD-card-Modul).....	56
5	Herstellung der Leistungsmesseinrichtung	57
5.1	<i>Programmcode</i>	57
5.2	<i>UI-Gehäuse</i>	59
5.2.1	UI-Interface.....	60
5.3	<i>Mess-Gehäuse</i>	62
5.3.1	Messkarte.....	63
5.3.2	Arduino-Shield	65
5.3.3	LCD mit I ² C-Modul	66
5.3.4	SD-Card-Modul mit Spannungsteiler	67
5.3.5	Sub-D-Stecker	67
5.3.6	Herstellung der Stecker	69

6	Bedienung Leistungsmesseinrichtung	70
6.1	<i>Kalibrierung Leistungsmesseinrichtung</i>	70
6.1.1	Kalibrierung	70
6.1.2	Signallaufplan	71
6.1.3	Programmcodeanpassung.....	72
6.2	<i>Bedienungsanleitung.....</i>	74
6.2.1	Anschluss der Leistungsmesseinrichtung	74
6.2.2	Gesamte Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung	76
6.2.3	Inbetriebnahme der Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung	77
6.3	<i>Aufbewahrung der Leistungsmesseinrichtung</i>	79
7	Validierung.....	80
8	Kostenanalyse	83
8.1	<i>Kostenaufstellung.....</i>	84
8.1.1	Stückkosten	84
8.1.2	Arbeitskosten.....	85
8.1.3	Gesamtkosten	86
9	Fazit und Ausblick.....	87
	Literaturverzeichnis	90
	Anhang.....	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umsatzentwicklung in der Sensorik und Messtechnik in Deutschland in den Jahren 2 004 bis 2016[1]	5
Abbildung 2: HM8115-2, Leistungsanalysator	7
Abbildung 3: HMC8015, Leistungsanalysator	8
Abbildung 4: Leistungsmesser PCE-360	10
Abbildung 5: Dreiphasiger Energie-Logger Fluke 1730/EU	12
Abbildung 6: AMP PA PQ55A, 3-Phasen-Leistungs- und -Energiesmesser	14
Abbildung 7: Mavowatt 30	16
Abbildung 8: Indirekte und direkte Leistungsmessung [11, p. 45]	19
Abbildung 9: Scheitelwert und Effektivwert [11, p. 125]	20
Abbildung 10: Prinzipieller Aufbau eines 3-phasen-Drehstromgenerators(Erzeuger) [11, p. 153]	21
Abbildung 11: Drehstromsystem im Drei-Phasen-Wechselstromnetz [11, p. 123].....	22
Abbildung 13: Scheinleistung S	23
Abbildung 12: Wirkleistung P	23
Abbildung 14: induktive Blindleistung Q [11, p. 140]	24
Abbildung 15: Leistungsdreieck.....	25
Abbildung 16: Blockschaltbild Leistungsmessumformer [11, p. 160].....	27
Abbildung 17:Einwattmeter-Schaltung im Vierleiter-Drehstromnetz [11, p. 160].....	28
Abbildung 18: Zweiwattmeter-Schaltung oder Aronschaltung [11, p. 160].....	28
Abbildung 20: Schaltung eines Stromwandlers [11]	29
Abbildung 19: Messprinzip eines Stromwandlers [34].....	29
Abbildung 22: Schaltung eines Spannungswandlers[8]	30
Abbildung 21: Funktionsprinzip eines Spannungswandlers [36]	30
Abbildung 23: Bildliche Darstellung der Messkategorien [15]	31
Abbildung 24: 3-A-Prinzip.....	35
Abbildung 25: Blockschaltbild Analog-Konzept	36
Abbildung 26: Blockschaltbild Analog-Konzept	36

Abbildung 27: Blockschaltbild Digital-Konzept	37
Abbildung 28: Blockschaltbild Digital-Konzept	37
Abbildung 29: Blockschaltbild Analog-Digital-Konzept.....	38
Abbildung 30: Blockschaltbild Analog-Digital-Konzept.....	38
Abbildung 31: Stromwandler	40
Abbildung 32: Spannungswandler	40
Abbildung 33: Mikrokontroller Arduino Mega	41
Abbildung 35: I ² C-Modul der LCD-Rückseite.....	41
Abbildung 34: LCD 20x4	41
Abbildung 36: SD-Card-Modul	42
Abbildung 37: SD-Card 16GB.....	42
Abbildung 38: Sub-D-Stecker (oben männlich und unten weiblich).....	42
Abbildung 39: 4*4 Key-Pad.....	43
Abbildung 40: LiPo-Akku, 7,4 Volt.....	43
Abbildung 41: UI-Gehäuse IP41	44
Abbildung 42: Mess-Gehäuse IP54.....	44
Abbildung 43: Ausschnitt Schaltplan UI-Interface.....	46
Abbildung 44: Ausschnitt Schaltplan Messkarte.....	50
Abbildung 45: Schaltplan Arduino-Shield	54
Abbildung 46: Schaltplan Spannungsteiler für SD-Card-Modul.....	55
Abbildung 47: Blockbild Programmcode.....	57
Abbildung 48: Rückseite UI-Gehäuse	59
Abbildung 49: Frontseite UI-Gehäuse	59
Abbildung 50: Layout UI-Interface	60
Abbildung 51: Fotoplatine mit Layout-Folie	60
Abbildung 52: Entwickler-Bad mit Foto-Platine	60
Abbildung 53: Säure-Bad mit Foto-Platine	60
Abbildung 54: Vorbereitung zum Löten	61
Abbildung 55: Bestückungsplan UI-Interface.....	61

Abbildung 56: Mess-Gehäuse Draufsicht	62
Abbildung 57: Mess-Gehäuse Ansicht von rechts	62
Abbildung 58: Layout Messkarte mit Ober- und Unterseite.....	63
Abbildung 59: Bestückungsplan Messkarte Oberseite	63
Abbildung 60: Fertiggelötete Messkarte der Oberseite.....	63
Abbildung 61: Bestückungsplan Messkarte Unterseite	64
Abbildung 62: Fertiggelötete Messkarten der Unterseite	64
Abbildung 63: Messkarte im Mess-Gehäuse	64
Abbildung 64: Layout Arduino-Shield.....	65
Abbildung 65: Bestückungsplan Arduino-Shield	65
Abbildung 66: Arduino-Shield nach Fertigstellung	66
Abbildung 67: Oben rechts I²C-Modul auf dem LCD	66
Abbildung 68: SD-Card-Modul mit Spannungsteiler von oben	67
Abbildung 69: Sub-D-Stecker männlich, links Vorderansicht, mittig Lötansicht von hinten, rechts Belegungsplan [29].....	67
Abbildung 70: Sub-D-Stecker weiblich, links Vorderansicht, mittig Draufansicht, rechts Belegungsplan [29].....	67
Abbildung 71: Datenkabel mit Sub-D-Steckern.....	68
Abbildung 73: Verbindung Sub-D-Stecker mit der Platine im UI-Gehäuse	68
Abbildung 73: Verbindung Sub-D-Stecker mit der Platine im Mess-Gehäuse.....	68
Abbildung 74: Klemmstecker vor, beim und nach der Verarbeitung.....	69
Abbildung 75: Sekundärspannung einstellen auf dem UI-Interface	70
Abbildung 76: Phasenverschiebung und Messgleichrichter einstellen auf der Messkarte	71
Abbildung 77: Signalverlaufsplan	71
Abbildung 78: UI-Gehäuse offen, Anschlüsse im Inneren	74
Abbildung 79: Mess-Gehäuse offen, Anschlüsse im Inneren.....	75
Abbildung 80: mobile Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung	76
Abbildung 81: UI-Gehäuse mit Spannungskabel(rot/blau) und Stromwandler(schwarz).....	77
Abbildung 82: Schematischer Anschluss der Stromwandler und Spannungskabel am Drehstrom-Leiternetz.....	77

Abbildung 83: Beispiel Messanschluss	78
Abbildung 84: Transport Alu-Koffer	79
Abbildung 85: Anordnung Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung im Alu-Koffer.....	79
Abbildung 86: Ingenieursgehälter nach Branche von 2002 bis 2016 [30]	80
Abbildung 87: Messaufbau zur Validierung der Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung	87
Abbildung 88: Wechselspannung von 229 V	89
Abbildung 90: Phasenverschiebung von 0.61	89
Abbildung 89: Phasenverschiebung von 1.00.....	89
Abbildung 91: Phasenverschiebung von 0.31	89
Abbildung 92: Stromstärke von 48 A	90
Abbildung 93: Wirkleistung von 3,18 kW	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Formelzeichen und Einheiten	19
Tabelle 2: Unterteilung der Messkategorien	31
Tabelle 3: IP-Schutzarten elektrischer Betriebsmittel [11]	32
Tabelle 4: Anforderungsliste	35
Tabelle 5: Vorteile/Nachteile Analog-Konzept	38
Tabelle 6: Vorteile/Nachteile Digital-Konzept	39
Tabelle 7: Vorteile/Nachteile Analog-Digital-Konzept	41
Tabelle 8: Stückkostentabelle	84
Tabelle 9: Entwicklungskostentabelle	86
Tabelle 10: Herstellungskostentabelle	86
Tabelle 11: Arbeitskostentabelle	87
Tabelle 12: Gesamtkostentabelle unbereinigt	88
Tabelle 13: Gesamtkostentabelle bereinigt	88

Abkürzungsverzeichnis

MC	Mikrocontroller
ADC	Analog-Digital-Converter = Analog-Digital-Wandler
EVU	Energieversorgungsunternehmen
OPV	Operationsverstärker
RTC	Real-Time-Clock
LCD	Liquid-Crystal-Display
LED	Leuchtemissionsdioden

1 Einleitung

In der Einleitung soll der Grund bzw. die Motivation für die Anfertigung der Bachelorarbeit verdeutlicht werden. Dabei wird das Ziel der Arbeit mit ihrer Problemstellung aufgezeigt und wie sich die Arbeit nachfolgend aufbaut.

Die Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung ist ein mobiles Messgerät zur Messung elektrischer Leistung, welche zu Kontroll- und Messzwecken in der Industrie eingesetzt werden soll.

1.1 Motivation

In dem Studiengang Produktionstechnik und -management ist ein Hauptpraktikum vorgeschrieben, welches Bestandteil des Studiums an der HAW Hamburg ist.

Das Praktikum fand in der Lebensmittelindustrie, einer Brotbackfabrik mit 6 Produktionslinien statt. Die Primäraufgabe bestand darin, eine Ist-Analyse für sämtliche Energieverbräuche durchzuführen und diese in einer übersichtlichen Tabelle zusammenzufassen. Das Ziel war die größten Energieverbraucher ausfindig zu machen, um anschließend mögliche „Energiefresser“ zu beseitigen und Energiekosten einsparen zu können. Da dieses Vorhaben in solcher Form im Unternehmen neu und nie durchgeführt wurde, sollte ein Vorgehensplan entwickelt werden. Dazu wurde die gesamte Fabrik in ihre Funktionsbereiche unterteilt und die Energie bzw. der Stromverbrauch gemessen. Die Messung wurde mit einem Elektrofachmann aus demselben Unternehmen durchgeführt. Dafür wurden ein einfaches Multimeter sowie eine Strommesszange verwendet. Die eigentliche Schwierigkeit bestand darin, die Messwerte schnellgenug abzulesen und in die Tabelle einzutragen, weil diese sich ständig wegen der Schaltsteuerung verändert haben. Daher wurde die Messung mehrmals wiederholt, um einen plausiblen Wert zu erhalten. Die Messwerte haben sich in der Intensität ständig verändert, sodass festgestellt werden musste, dass mit den vorhandenen Messmitteln, die Werte nur grob abgeschätzt werden können und dass eine besondere Messeinrichtung dafür notwendig sei, um genauere Messwerte zu erhalten.

Aufgrund dieser Erfahrung wurde die mobile Leistungsmesseinrichtung entwickelt und hergestellt, um in der Industrie genaue Messwerte zu erhalten. Die Tatsache, dass alle bis jetzt kennengelernten Unternehmen ihre Verbräuche abschätzen, hat zum Bau dieser Einrichtung motiviert.

Die Herausforderung den Studiengang Produktionsmanagement mit Elektrotechnik und dem Programmieren von Mikrocontrollern zu ergänzen, hat den Ansporn geliefert die Leistungsmesseinrichtung zu bauen und in Form einer Bachelorthesis mit wissenschaftlichen Methoden zu erstellen.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit war zunächst das wissenschaftliche Schreiben und das methodische Vorgehen während der Entwicklungs-, und Herstellungsphase zu erlernen.

Das weitere Ziel war die Entwicklung und Herstellung einer kostengünstigen mobilen Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung für den industriellen Einsatz. Dafür sollte die Leistungsmesseinrichtung den Drehstrom und die Spannung messen und die Schein-, Wirk-, und Blindleistung in Echtzeit an einem Display ausgeben. Die Messanlage sollte mobil und bei Stromausfall weiterhin Einsatzbereit sein. Die Messdaten sollten auf einem externen Speicher aufgezeichnet werden. Zudem sollte die Einrichtung einfach zu bedienen sein und in einem handlichen Aufbau integriert werden, der die VDI-Richtlinien einbezieht.

Ein weiteres Ziel ist die die Programmierung eines Arduino Mega, bei dem die Programmierkenntnisse erweitert werden sollen. So soll in Zukunft es möglich sein, die Messdaten zu digitalisieren und bei Prozessoptimierung, wie bei Energieeinsparung, nutzen zu können. So könnte dieses Messsystem die „Industrie 4.0“ in die Industrien bringen.

1.3 Problemstellung der Arbeit

Bei der Messung von Drehstrom und bei der Ausgabe der Leistungsgrößen kommt es auf die Genauigkeit der Daten, auf die einfache Handhabung und auf den Sicherheitsaspekt im Umgang mit der Messtechnik an. Diese Anforderungen bringen einen gewissen Anspruch mit sich, dem man gerecht werden sollte. Dabei stehen die Kosten, die Qualität und die Ressourcen sich gegenüber, dessen „richtiges“ Mittelmaß einzuhalten ist.

Im Vordergrund steht die Mindestanforderung an die Genauigkeit der Messeinrichtung, damit ein wahrheitsgetreues und aussagekräftiges Messergebnis präsentiert werden kann. Weiterhin soll die vergleichbare Einrichtung günstiger als die von den Markt Angebote Lösung sein, wodurch bereits bei den Stückkosten und beim Kauf elektronischen Komponenten geschaut

und verglichen werden sollte. Beim Kauf von Komponenten in China, sind die Transport- und Lieferzeiten häufig länger als geplant und bei der Planung zu berücksichtigen.

Auf dem Markt existieren bereits viele Anbieter von elektronischen Komponenten und Messsystemen, die nur schwer zu überschauen sind. Daher lohnt es sich umso genauer hinzuschauen, um sich einen Marktüberblick zu verschaffen, welches sehr viel Zeit in Anspruch nehmen kann.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit soll einen Überblick über die Bachelorthesis verschaffen. In der Einleitung sollte daher zunächst die Motivation den Grund der gewählten Arbeit verdeutlichen, sowie damit verbundenem Ziel und der Problemstellung aufzeigen. Eine Mindestanforderung an grundlegenden Kenntnissen der Mathematik und Physik werden dabei vorausgesetzt.

Eine Marktanalyse soll einen Überblick über mobile Leistungsmesseinrichtungen auf dem Markt verschaffen. Weiterhin soll in einer einfachen Sprache die theoretischen Grundlagen aus der Elektrotechnik erklärt werden. So werden dabei auch gesetzliche Vorschriften mit VDI-Richtlinien aus der Messtechnik angeschnitten.

Im Hauptteil werden in der Entwicklungsphase unterschiedliche Konzepte, die verwendeten Komponenten, die Software und die entwickelten Schaltpläne vorgestellt. Danach wird die Herstellung der Einrichtung beschrieben und mit Bildern erläutert. Mit der beschriebenen Messeinrichtung wird u.a. die Kalibrierung, die Programmcodeanpassung und die Bedienungsanleitung erklärt. Bei der Kostenanalyse sollen die Stückkosten, die Entwicklungs- und Herstellkosten aufgezeigt werden. Die zuletzt folgende Validierung der Anlage stellt sicher, dass die Einrichtung richtig arbeitet. Das abschließende Fazit rundet mit dem Ausblick die Bachelorthesis ab.

2 **Stand der Technik**

In diesem Kapitel werden einige Marktanbieter mit ihren mobilen Drehstrom-Leistungsmesseinrichtungen vorgestellt.

Der globale Markt hat gewisse Vorteile mit sich gebracht. Dadurch gibt es eine große Auswahl an Anbietern für technische Lösungen für alle Arten von Problemstellungen. Viele Anbieter der Messtechnik liefern dafür Komplettlösungen. Um den Überblick zu bewahren, werden hier weitgehend deutsche Marktanbieter von Messgeräten vorgestellt.

2.1 **Mobile Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung**

Die Mobile Drehstrom-Leistungsmesseinrichtungen sind tragbare, meistens vom Stromnetz unabhängige und handliche Messeinrichtungen, um schnell an Ort und Stelle elektrische Messgrößen wie Wechselstrom und Wechselspannung festzustellen und anzuzeigen. Aus diesen Messgrößen lassen sich mit den Einrichtungen andere in der Elektrotechnik wichtige Werte herleiten, berechnen und ausgeben, dazu gehören z.B. die Wirk-, Schein-, und die Blindleistung, sowie die Phasenverschiebung bzw. die s.g. Leistungsfaktoren.

Die Messwerte lassen sich auf externe Datenträger speichern oder direkt via W-LAN über das Internet an jeden Ort der Welt übertragen, um diese später am Arbeitsplatz in Ruhe analysieren und auswerten zu können. Die oft mitgelieferte und geschützte Software wertet je nach Bedarf die gewünschte Messgröße aus und zeigt diese auf einem digitalen Display an. Die Einrichtungen lassen sich häufig schnell an Ort und Stelle aufbauen und intuitiv bedienen.

Diese Erkenntnisse sind in die Entwicklung der mobilen Leistungsmesseinrichtung mit eingeflossen.

2.2 Umsatzentwicklung in der Messtechnik

Der AMA Verband für Sensorik und Messtechnik hat 2017 insgesamt 460 Mitglieder. Diese wurden in der Studie [1] auf ihre wirtschaftliche Entwicklung befragt. Die Umfrageergebnisse spiegeln den allgemeinen Zustand dieser Branche wieder. Daraus kann ein Umsatzplus beobachtet werden und aufgrund der zunehmenden Digitalisierung werden diesem Industriezweig gute Aussichten prognostiziert [2].

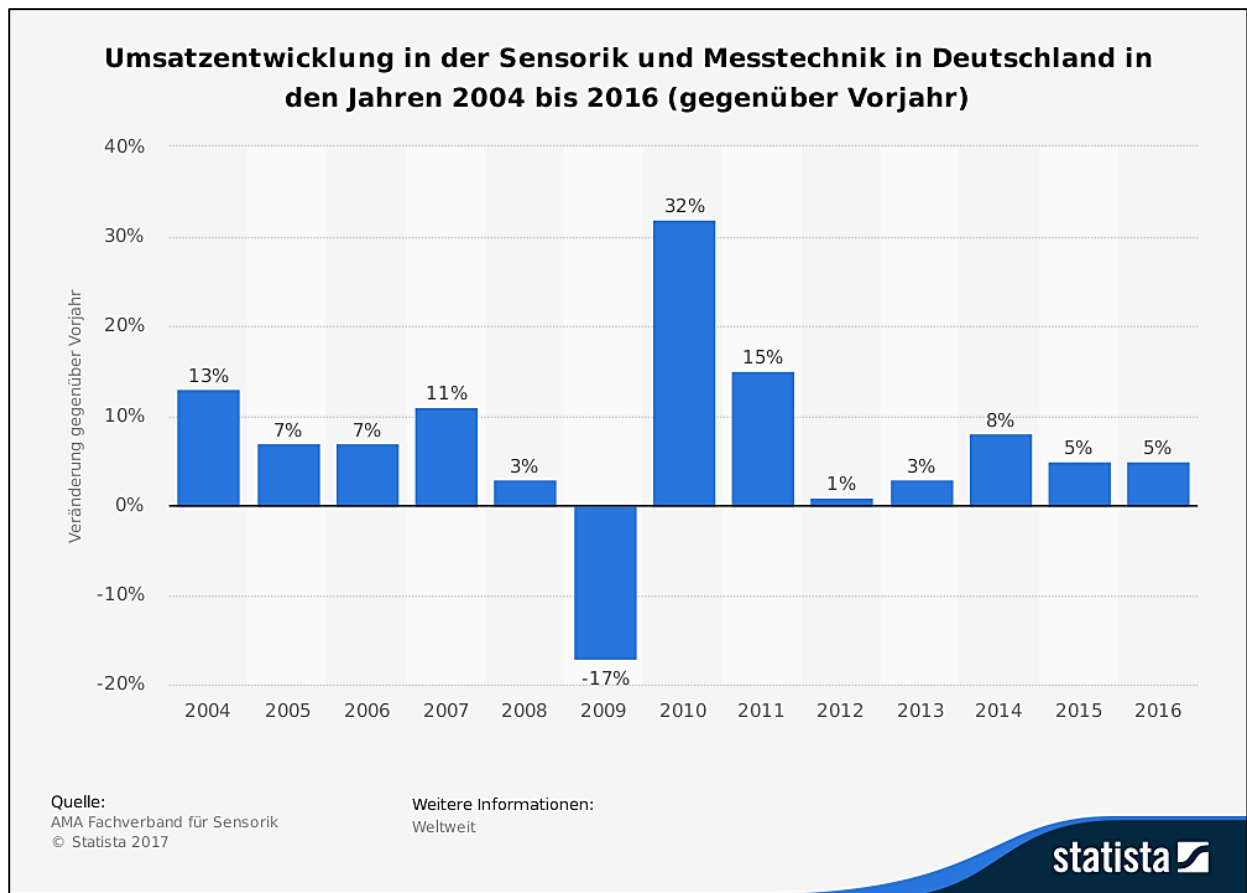


Abbildung 1: Umsatzentwicklung in der Sensorik und Messtechnik in Deutschland in den Jahren 2004 bis 2016[1]

2.3 Marktanalyse und Marktpreise

Auf dem deutschen Markt gibt es zahlreiche Anbieter von mobilen Drehstrom-Leistungsmesseinrichtungen, die sich entweder durch den Preis und oder durch Qualität unterscheiden. Häufig steht der Preis bei der Anschaffung solcher Einrichtung an erster Stelle, wobei unerwartet hohe Folgekosten für weitere Zubehörteile, für Software-Updates oder Ersatzteile entstehen können.

Beim Kauf einer Messeinrichtung empfiehlt es sich eine Marktanalyse durchzuführen, um ein Gesamtbild über das Markangebot zu erhalten und dieses zu vergleichen.

Umso wichtiger ist es zu wissen, wozu die Leistungsmesseinrichtung eingesetzt werden soll und ob dieses Ziel mit einer kostengünstigeren Lösung erreichen lässt. Hinzu kommt, dass nur Elektrofachkräfte diese Messungen an spannungsführenden Leitern durchführen dürfen und weitere Mitarbeiter zusätzlich zur Analyse der Daten ggf. ausgebildet werden müssten, wodurch weitere Kosten entstehen können.

2.4 Marktanbieter

Folgende bekannte Marktanbieter wie FLUKE, GOSSEN METRAWATT, ROHDE UND SCHWARZ, PCE und AMPROBE wurden ausgesucht und näher betrachtet. Die hergestellte mobile Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung konkurriert letztendlich mit den Anbietern dieser Lösungen.



Zur Validierung der hergestellten Leistungsmesseinrichtung, wurde eine Leistungsmesseinrichtung der Firma ROHDE & SCHWARZ HM8115-2 eingesetzt, welches nicht zu den mobilen Einrichtungen zählt, da diese für den stationären gebrauch gebaut wurde.

Die nachfolgenden Geräte der Marktanbieter wurden zum Vergleich nach ihrem Preis, ihrer Ausstattung, ihrem Lieferumfang und Einsatzgebiet ausgewählt. Die Beschreibungen wurden auf der Internetseite der jeweiligen Anbieter entnommen.

2.4.1 ROHDE & SCHWARZ

R&S HM8115-2, Leistungsanalysator, 1 Kanal



Preis(brutto): 558,00 € [3]

nicht mehr lieferbar [20.06.2017]

Abbildung 2: HM8115-2, Leistungsanalysator

Dieser Leistungsanalysator HM8115-2 diente bei der Validierung der hergestellten Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung, welches an der HAW Hamburg verwendet wird.

Lieferumfang beim R&S HM8115-2:

- 1-Kanal-Leistungsanalysator
- Bedienungseinleitung
- PC-Software

Beschreibung von R&S HM8115-2:

HM8115-2 ist ein benutzerfreundlicher Leistungsmesser mit automatischer Messbereichseinstellung für die Verwendung in Laboren und zur Leistungsüberwachung mit hoher Messgenauigkeit. Hier ist die simultane Anzeige von Spannung, Strom und Leistung besonders nützlich. Die RS-232-Schnittstelle ermöglicht die Datenübertragung zwischen dem Gerät und einem PC.

Besonderheiten von R&S HM8115-2:

- Leistungsmessung bis 8kW
- Simultane Anzeige von Spannung, Strom und Leistung
- Separate Messung von aktiver Leistung, reaktiver Leistung und Scheinleistung
- Anzeige des Leistungsfaktors
- Automatische Bereichswahl und einfache Bedienung
- Datenausgabe und Funktionssteuerung über RS-232 [4]

R&S HMC8015, Leistungsanalysator, 2 Kanäle



Preis(brutto): 1.650,00 € [5]

[Stand: 20.06.2017]

Abbildung 3: HMC8015, Leistungsanalysator

Lieferumfang beim R&S HMC8015:

- 2-Kanal-Leistungsanalysator
- Bedienungseinleitung
- PC Software

Beschreibung von R&S HMC8015:

Der HMC8015 von Rohde & Schwarz ist ein benutzerkonfigurierbarer kompakter Zwei-Kanal-Leistungsanalysator zum Charakterisieren von AC/DC-Last- und -Standbystrom. Das Gerät ermöglicht Messungen ohne zusätzliche Tools, wie Computer oder Fernmesseinrichtungen, und liefert zusätzlich zu einer numerischen und grafischen Anzeige von 26 Hauptparametern Leistungs- und Konformitätsprotokolle im Einklang mit IEC62301, EN50564 und EN61000-3-2. Die Oberschwingungsanalyse wird bis zur 50. Harmonischen auf der logarithmischen Skala grafisch dargestellt. Der Analysator setzt im Hinblick auf die Dokumentation neue Standards. Er zeigt simultan bis zu 10 benutzerkonfigurierbare Messgrößen mit einer Aktualisierungsrate von 10 Messwerten pro Sekunde an. Eine Protokollier-Funktion ermöglicht die Speicherung dieser Daten mit Zeitstempel im CSV-Format für eine so gut wie unbestimmte Zeitdauer. Auch die Bildschirminhalte können jederzeit per Knopfdruck auf ein USB-Flash-Laufwerk gespeichert werden.

Besonderheiten von R&S HMC8015:

- Klare Anzeige aller gemessenen Parameter, leuchtstarke QVGA-Farbanzeige (320x240 Pixel)
- Grundgenauigkeit 0.05%, Langzeitprotokollierung von Daten im CSV-Format über USB-Flash-Laufwerk
- An die jeweilige Messaufgabe anpassbares Dreistufen-Filtersystem
- Echter Verbrauchszähler dank hardware-basiertem Integrator
- 26 verschiedene Mess- und Rechenfunktionen, Abtastrate 500kS/s
- Leistungsmessung von 50 μ W bis 12kW, Analogbandbreite von DC bis 100kHz
- Frontpanel mit 4mm-Sicherheitsanschlüssen und Rückwand
- USB-Port (virtueller COM-Port, TMC), Ethernet-Port (LXI) mit integriertem Web-Server
- Fernbedienung über SCPI-basierte Befehle
- Treiberpakete für LabVIEW, LabWindows/CVI, VXI, IVI.net [5]

2.4.2 PCE



PCE-360 3-Phasen-Leistungsmesser



Preis(brutto): 1.304,12 € [6]

[Stand: 20.06.2017]

EAN: 4250348700353

Abbildung 4: Leistungsmesser PCE-360

Lieferumfang beim PCE-360:

- 1 x 3 -Phasen-Leistungsmesser PCE-360,
- 4 x Stromzange,
- 4 x isolierte Abgreifklemme an je 3 m Kabel,
- 4 x Sicherheitsmessleitung,
- 8 x Batterie,
- 1 x Netzadapter,
- 1 x Tragetasche,
- 1 x RS-232-PC- Kabel,
- 1 x Software (englischsprachig, deutsch beschrieben und bebildert),
- Bedienungsanleitung

Beschreibung von PCE-360:

Der Drei - Phasen - Leistungsmesser (Power-Analyzer) PCE-360 dient zur ein- oder dreiphasigen Leistungsmessung. Dabei stellt das große Display des Leistungsmessers bis zu 10 Werte gleichzeitig dar. 4 Stromzangen können gleichzeitig adaptiert werden. Im manuellen Modus kann der Leistungsmesser 99 Messwerte direkt speichern. Im Datenlogger-Modus können bis zu 20000 Messwerte gespeichert werden. Somit ist dieses 3 Phasen Leistungsmessgerät optimal zur Langzeitanalyse einsetzbar. Die im Gerät gesammelten Messwerte können bei Belieben zu einem PC übertragen und ausgewertet werden. Im Lieferumfang ist alles enthalten, was Sie zur Messung und Auswertung benötigen (auch Software und Datenkabel). Das Leistungsmessgerät wird werkskalibriert ausgeliefert, kann aber optional auch laborkalibriert und nach ISO zertifiziert werden (bei Erstbestellung oder auch bei einer Rekalibrierung, z.B. jährlich). [6]

2.4.3 FLUKE

FLUKE

1730/EU Dreiphasiger Energie-Logger



Preis(brutto): 2.961,91 € [7]

[Stand 20.06.2017]

EAN: 9596965521

Abbildung 5: Dreiphasiger Energie-Logger Fluke 1730/EU

Lieferumfang beim 1730/EU:

- 1 Stuck 1730-flex1500 Thin-Flexi Current Probe, 30,5 cm
- Spannungsprüfleitung
- Delphinklemme, schwarz
- Prüfleitung mit aneinanderreihbaren Steckern, 10 cm
- Prüfleitung mit aneinanderreihbaren Steckern, 2 m
- Clips mit Farbkennzeichnung
- Netzteil + Netzkabel
- Gleichstrom-Spannungsversorgungskabel
- USB-Kabel A, Mini-USB
- Aufbewahrungstasche/-koffer
- Beschriftungsaufkleber für Eingangsanschlüsse
- USB-Speicherstick 4 GB
- PC®-Anwendungssoftware
- Bedienungsanleitung

Beschreibung von 1730/EU:

Der dreiphasige Energy Logger Fluke 1730 wurde speziell für energiebewusste Kunden entwickelt. Mit ihm lassen sich Stellen, an denen Energie verschwendet wird, einfach erkennen. Die Aufzeichnung des Energieverbrauchs in Ihrem Gebäude hilft dabei, Möglichkeiten für Energieeinsparungen zu identifizieren, und liefert leicht verständliche Daten, die die Grundlage für entsprechende Maßnahmen bilden. Einfach erkennen, wann und wo Energie in Ihrem Gebäude verbraucht wird, von der Zuführung der Versorgungsleitungen bis hin zu den einzelnen Stromkreisen. Mit dem Softwarepaket für Energieanalyse mehrere Datenpunkte über einen bestimmten Zeitraum vergleichen und sich so ein vollständiges Bild über den Energieverbrauch verschaffen. Spezielle Punkte der Energieverluste schnell erfassen und dadurch Ihre Energiekosten einfacher denn je senken. [7]

2.4.4 AMPROBE



AMP PA PQ55A: 3-Phasen-Leistungs- und Energiemessung



Preis(Brutto): 1.546,95 € [8]

[Stand: 20.06.2017]

EAN: 0095969417433

Abbildung 6: AMP PA PQ55A, 3-Phasen-Leistungs- und -Energiemesser

Lieferumfang beim AMP PA PQ55A :

- 1 St. PQ55A
- 4 St. Stromzangen 1000 A
- 4 St. Abgreifklemmen, isoliert
- 4 St. Sicherheitsmessleitungen
- 8 St. 1,5 V-Batterie LR6
- 1 St. Netzadapter
- 1 St. RS-232-Kabel
- 1 St. Große Tragetasche
- 1 St. Bedienungsanleitung
- 1 St. PC-Software (für Windows ME/2000/XP)

Beschreibung von AMP PA PQ55A:

Funktionen:

- Umfangreiche Echtzeitüberwachung, Aufzeichnung und Analyse von 3-Phasen-Systemen
- Spannungsmessung (Echt-Effektivwert) Strommessung (Echt-Effektivwert)
- Leistungsfaktormessung
- Phasenwinkelmessung
- Leistungsanalyse (Wirk-, Schein- und Blindleistung)
- 4. Stromzange zur Neutralleitermessung
- Anwendung im Wohnungsbau, Büro und Kleinbetrieben Geräteinformationen
- Interner Datenlogger von 512 kB für Langzeitüberwachungen
- Interner Messwertspeicher für max. 99 Einzelmessungen
- Multifunktionale Messwertanzeige aller Eingangssignale
- Stromversorgung wahlweise über Batterien oder über externen Netzadapter
- Datenübertragung über optisch isolierte RS-232-Schnittstelle
- Windows-Software für Datenanalyse [8]

2.4.5 Gossen Metrawatt

Mavowatt 30, Flex Paket, Netz-Analysegerät, Netzanalysator, M810F



Preis(brutto): 5.295,50 € [9]

[Stand: 20.06.2017]

EAN: 4012932127263

Abbildung 7: Mavowatt 30

Lieferumfang beim Mavowatt 30:

- MAVOWATT 30
- Messleitungssatz
- Akku + Ladegerät
- 4 GB CF-Speicherkarte
- Werkskalibrierschein
- Transporttasche
- DranView 7 Professional Software
- 3-Phasen Stromsensor METRAFLEX 3003 XBL
- 1x Stromsensor METRAFLEX 3001 XBL

Beschreibung von Mavowatt 30:

Der dreiphasige Energie- und Netzstöranalysator MAVOWATT 30 erfüllt sowohl die für Netzqualitätsmessung relevanten Normen EN50160, EN61000-4-7, EN61000-4-15, als auch die EN61000-4-30, in der Messverfahren für die Spannungsqualität definiert sind. Das Klasse A Gerät überwacht simultan Effektivwerte, Harmonische, Flicker und Transienten bis in den Zeitbereich von ca. 80µs. Der MAVOWATT 30 hat 8 Messkanäle, jeweils 4 für Spannung und 4 für Strom. Anhand der anliegenden Messgrößen werden Messkonfiguration und Stromkreisart automatisch erkannt. Die Überwachungsart bei automatischer Grenzwertdefinition ist einfach einzustellen. Die intuitive Bedienung erfolgt über Icons auf dem farbigen Touch-Display. Die Englisch / Europäische Sprachausführung kann zwischen Englisch, Französisch, Finnisch, Deutsch, Italienisch, Polnisch, Spanisch und Schwedisch umgeschaltet werden. Bei der Englisch / Asiatische Variante stehen Englisch, Chinesisch (einfach & traditionell), Japanisch, Koreanisch und Thailändisch zur Auswahl. Erfasste Daten werden auf Compact Flash-Speicherkarten ≥4 GB (Lieferumfang) abgelegt. Datenkommunikation ist optional über RS232-, Ethernet- oder USB-Schnittstelle möglich. [9]

3 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen sollen das Grundverständnis der Vorgänge im inneren der Messeinrichtung beschreiben. Dabei setze ich elektrotechnische und mathematische Grundkenntnisse¹ voraus, da dies sonst den Rahmen dieser Bachelorarbeit sprengen würde.

Die VDI-Richtlinien sind technische Regeln, die von dem Verein Deutscher Ingenieure erstellt werden, um die Gesundheit der Menschen zu schützen. Darin werden diese Regeln als gesetzliche Richtwerte festgehalten, die in der deutschen Wirtschaft Anwendung finden. Dadurch soll auch eine sichere Kollaboration zwischen Mensch und Maschinen in der Messtechnik gewährleistet werden [13].

3.1 Grundlagen der Messgrößen

Messgrößen werden in der Elektrotechnik verwendet, um einen physikalischen Zustand zu beschreiben. Dadurch wird hier eingeschränkt mit Wechselgrößen aus der Drehstromtechnik gearbeitet, die notwendig sind, um diese Arbeit zu verstehen.

3.1.1 Strom, Spannung, Widerstand und Leistung

Die Stromstärke(I) wird mit einem Multimeter in reihe, die Spannung(U) parallel und der Widerstand entweder aus U und I berechnen oder am Verbraucher im ausgebauten Zustand parallel gemessen.

¹ Seine Grundkenntnisse zu verbessern, wird das Taschenbuch „Elektronik-Fibel“ von Patrick Schnabel [10] empfohlen. Darin werden Grundlagen der Elektrotechnik und gängige elektronische Bauelemente erklärt. Für den Beruf und täglichen Gebrauch ist das Lehrbuch „Fachkunde Elektrotechnik“ von Europa Lehrmittel Verlag [11] empfehlenswert. Für die Grundlagen in der Messtechnik kann das Fachbuch von Thomas Mühl „Einführung in die elektrische Messtechnik“ [12] behilflich sein.

Die Leistung wird aus U und I berechnen oder mit einem Leistungsmessgerät (**Wattmeter**) in reihe und parallel gemessen. Man unterscheidet zwischen indirekter und direkter Leistungsmessung.

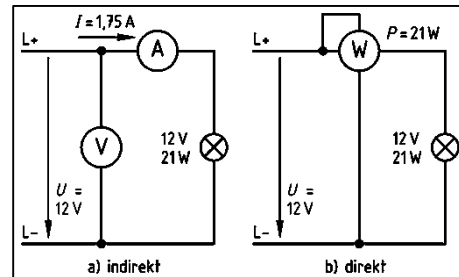


Abbildung 8: Indirekte und direkte Leistungsmessung [11, p. 45]

Tabelle 1: Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Größe	Formel	Einheit	Einheitenzeichen
I	Stromstärke	$I = \frac{U}{R}$	Ampere	A
U	Spannung	$U = R * I$	Volt	V
R	Widerstand	$R = \frac{U}{I}$	Ohm	Ω
P	Leistung	$U * I = I^2 * R = \frac{U^2}{R}$	Watt	W

3.1.2 Wechselstrom und Gleichstrom

Wechselstrom(AC) resultiert aus sich ständig wechselnden Fließrichtungen der Elektronen im Leiter. Es lässt sich daraus ein sinusförmiger Verlauf(Welle) über eine Periode aufzeichnen.

Gleichstrom(DC) ist ein konstanter Wert, der sich über die Zeit nicht ändert. Dieser entspricht dem Effektivwert des Wechselstromes.

3.1.3 Effektivwert und Scheitelwert

Der **Scheitelwert** bezeichnet die Amplitude (U-Dach oder Spitzen-Wert) und damit den maximalen messbaren Wert (\hat{u}) einer Wechselgröße z.B. einer Wechselspannung.

Der **Effektivwert** beträgt bei sinusförmigen Wechselgrößen ca. 71 bzw. Prozent des Scheitelwertes und entspricht auch dem Gleichstromwert. Der Effektivwert wird mit großen und der Augenblickswert (Messwert) mit kleinen Buchstaben bezeichnet [11, p. 125]. Bei der Messung wird in der Regel der Effektivwert (RMS) angezeigt. RMS=Root-Mean-Square, was im englischen quadratischer Mittelwert bedeutet.

$$\text{.Scheitelwert: } \hat{u} = \sqrt{2} * U \text{ [V]}$$

$$\text{Effektivwert: } U = U_{eff} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = 0,707 * \hat{u} \text{ [V]}$$

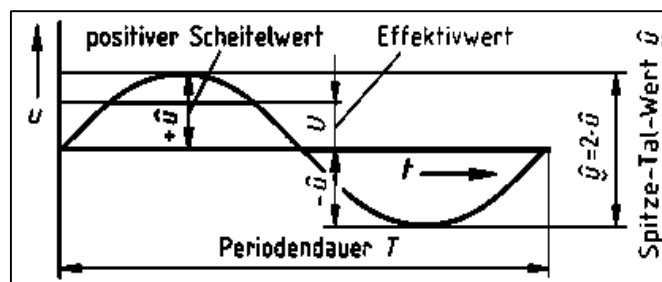


Abbildung 9: Scheitelwert und Effektivwert [11, p. 125]

3.1.4 Frequenz

Die Anzahl der Perioden je Sekunde nennt man **Frequenz(f)**. In Deutschland beträgt die Netzfrequenz 50 Hertz(Hz), welche einer Periodendauer(T) von 20ms entspricht. Die Netzfrequenz ergibt sich aus der Drehgeschwindigkeit des Drehstromerzeugers eines Energieversorgungsunternehmens(EVU) [11, p. 125]. Die **Kreisfrequenz(ω)** gibt die Winkelgeschwindigkeit im Bogenmaß an.

$$\text{Frequenz: } f = \frac{\omega}{2 * \pi} = \frac{1}{T} \quad [f] = \frac{1}{s}$$

$$\text{Kreisfrequenz: } \omega = 2 * \pi * f = \frac{2\pi}{T} \quad [\omega] = \frac{1}{s}$$

3.1.5 Drehstromerzeuger

Der Drehstrom wird auch Dreiphasenwechselstrom genannt. Mit jeder Drehung des Polrades wird in jeder Spule eine Wechselspannung erzeugt. Die Winkelgeschwindigkeit sowie die Frequenz sind von der Umdrehungsgeschwindigkeit des Polrades abhängig.

Die Spulen sind um 120 Grad zueinander versetzt angeordnet, sodass die Phasenverschiebungen jeweils 1/3 Periode zueinander betragen. In den drei Spulen(Stränge) eines Generators(Erzeugers) werden drei Strangspannungen induziert. Diese drei Generatorwicklungen lassen sich zu einer Sternschaltung zusammenfügen. Dabei wird jeweils ein Anschluss der Spulen als Außenleiteranschluss herausgeführt. Die Außenleiter werden entsprechend als L1, L2 und L3 bezeichnet. Die zweiten Anschlüsse der Spulen werden zu einem Sternpunkt verbunden, der an den Neutralleiter(N) angeschlossen wird.

Die Sternschaltung mit L1, L2, L3 und N ergeben das Vierleiter-Drehstromnetz.

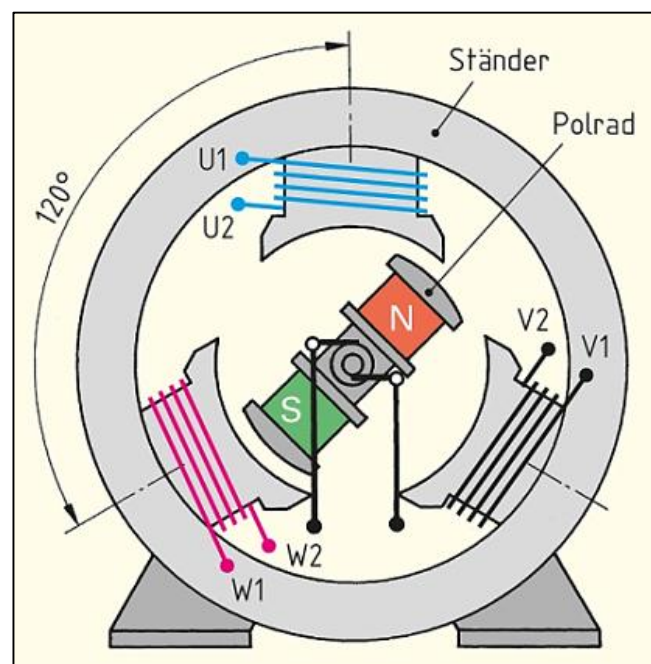


Abbildung 10: Prinzipieller Aufbau eines 3-phasen-Drehstromgenerators(Erzeuger) [11, p. 153]

3.1.6 Verkettung von Sternschaltung und Dreieckschaltung auf Verbraucherseite

Die Verbindung(**Verkettung**) der Spulenstränge kann in Stern- oder Dreieckschaltung realisiert werden, wobei bei der Dreieckschaltung der N-Leiter(Neutralleiter) zur Energieübertragung eingespart werden kann [11, p. 153].

In der **Dreieckschaltung** beträgt die Spannung(Außenleiterspannung) 400 Volt und ist somit um den Verkettungsfaktor($\sqrt{3}$) höher als die der **Sternschaltung** mit 230 Volt. Zwischen L- und N-Leiter beträgt die Spannung 230 Volt und innerhalb der Außenleiter 400 Volt.

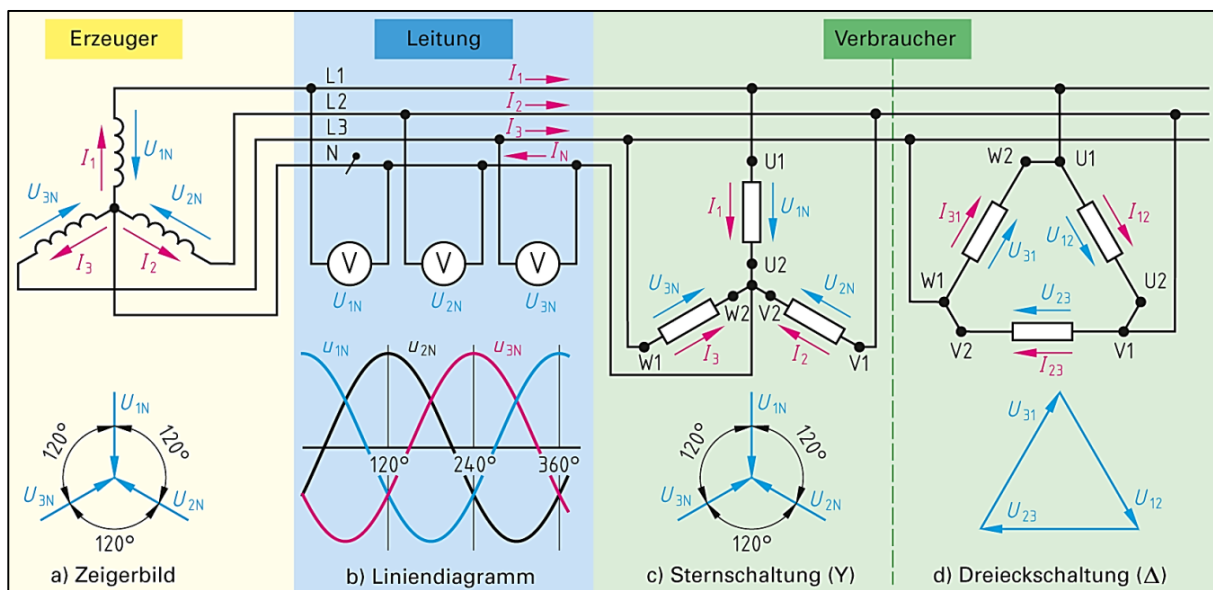


Abbildung 11: Drehstromsystem im Drei-Phasen-Wechselstromnetz [11, p. 123]

3.1.7 Phasenverschiebung

Eine **Phasenverschiebung** wird durch **kapazitive Blindwiderstände**(Kondensatoren) und/oder **induktive Blindwiderstände**(Spulen) im Stromnetz verursacht. Induktivitäten werden durch „Spulenhaltige Verbraucher“ wie Elektromotoren oder Transformatoren verursacht. Um diese Verschiebung auszugleichen werden Kondensatoren(Blindstromkompensatoren) eingesetzt. Bei kapazitiver Phasenverschiebung eilt der Strom der Spannung voraus und bei induktiver Phasenverschiebung eilt der Strom der Spannung nach. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung lässt sich in Ihrer Zeit zueinander oder auch als **Winkel „Phi“** ausdrücken [11, p. 133]. Sind im Netz nur **ohmsche Widerstände(Wirkwiderstände)** vorhanden, wird keine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom verursacht.

So sind beispielsweise in einer Backfabrik viele Elektromotoren(Spulen) und Backöfen(Wirkwiderstände), verbaut, die entweder parallel und oder in Reihe mit einander verschaltet sind. Je nach Verschaltungsart ändert sich die Phasenverschiebung und somit der Phasenwinkel(φ).

3.1.8 Scheinleistung

Scheinleistung(S) ergibt sich Multiplikation von Strom und Spannung. Diese kann größer oder gleich der Wirkleistung sein.

Scheinleistung:

$$S = U * I = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]}$$

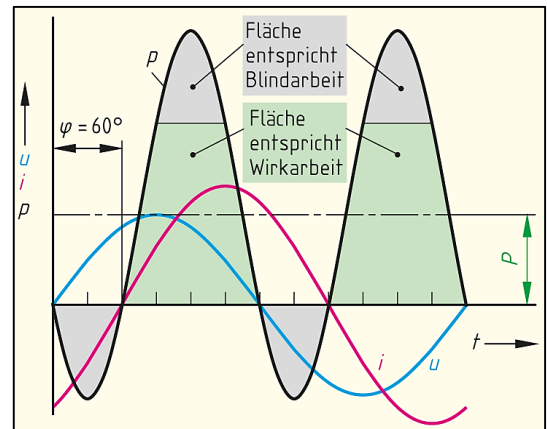


Abbildung 12: Scheinleistung S

3.1.9 Wirkleistung

Wirkleistung(P) existiert nur, wenn ausschließlich Wirkwiderstände(**Wirklast**) im Wechselstromkreis vorhanden sind. Strom und Spannung sind dabei in Phase und ergeben multipliziert immer eine positive Leistung. Positive Leistung bedeutet immer Energiefluss vom Erzeuger zum Verbraucher. Die Frequenz der Wirkleistung ist die Doppelte von Strom und Spannung. . Verlustleistung macht sich als Wärme bemerkbar.

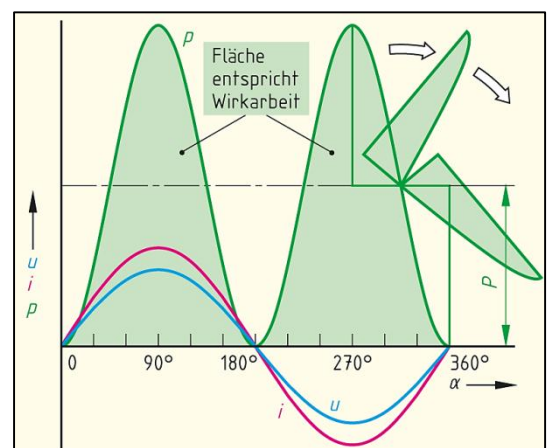


Abbildung 13: Wirkleistung P

Wirkleistung:

$$P = U * I * \cos(\Phi) = S * \cos(\Phi) \text{ [W]}$$

3.1.10 Blindleistung

Bei reiner **Blindleistung(Q)** pendelt die Energie zwischen Erzeuger und Verbraucher immer hin und her und kann nicht verbraucht werden. Diese Leistung sollte durch Blindleistungskompensatoren beseitigt werden.

Blindleistung:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = S * \sin(\Phi) \text{ [var]}$$

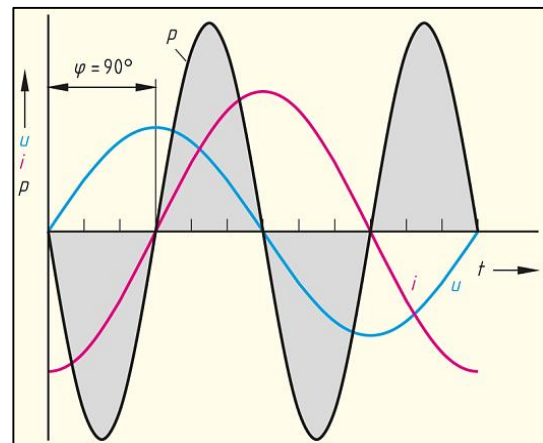
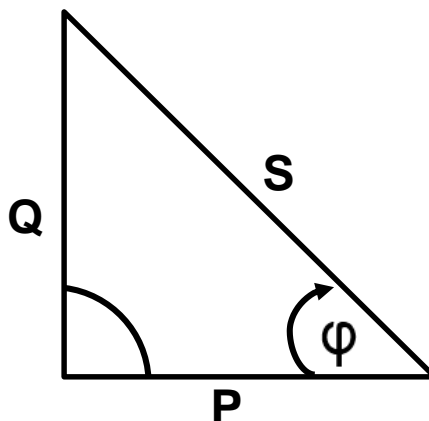


Abbildung 14: induktive Blindleistung Q [11, p. 140]

Zur Berechnung der aufgeführten Leistungen, kann das untenstehende Dreieck herangezogen werden. Die Leistungsgrößen werden mit Hilfe der Trigonometrie berechnet, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.



In der Industrie und wie bereits erwähnt in einer Backfabrik, kommen die Leistungsarten immer in **Mischformen** vor. Für die Messung unterschiedlicher Leistungsanteile, werden **spezielle Leistungsmesser(Leistungsmessumformer)** verwendet, die auch Wirk-, Schein- sowie Blindleistung anzeigen können.

3.1.11 Leistungsfaktoren

In der Industrie werden unterschiedliche Betriebsmittel zur Herstellung ihrer Produkte eingesetzt. Diese können je nach Aufbau und ihres Einsatzes, die sinusförmigen Verläufe im Netz verändern.

Die Veränderungen können durch folgende Leistungsfaktoren beschrieben werden [11, p. 141]. Hilfreich dabei ist ein s.g. Leistungsdreieck

$$\text{Wirkfaktor}(\cos(\Phi)) \rightarrow \text{Wirkfaktor: } \cos(\Phi) = \frac{P}{S} \quad [-]$$

$$\text{Blindfaktor}(\sin(\Phi)) \rightarrow \text{Blindfaktor: } \sin(\Phi) = \frac{Q}{S} \quad [-]$$

$$\text{Leistungsfaktor}(\lambda) \rightarrow \text{Leistungsfaktor: } \lambda = \frac{P}{S} \quad [-]$$

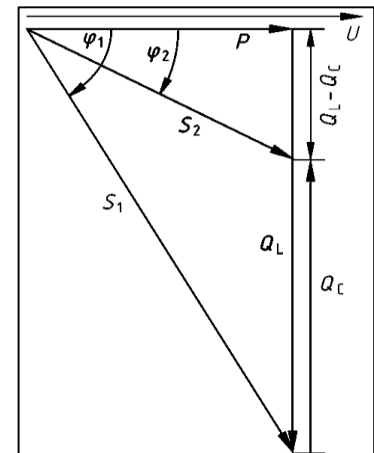


Abbildung 15: Leistungsdreieck

Spezielle Analysatoren können auch die Leistungsfaktoren als eine Größe ausgeben, woraus auf die Qualität und Beschaffenheit des Stromnetzes geschlossen werden kann. Sinkt der **Wirkfaktor unter $\cos(\Phi)$ von 0,9**, schreiben die **Energieversorgungs-unternehmen(EVU)** zum Schutz des Netzes eine Blindstromkompensation vor [14, p. 6].

3.1.12 Störgrößen im Netz

Die Grundschiwingung im Niederspannungsnetz(400V) beträgt 50 Hertz. Andere sich im Netz befindliche Anlagen können die Grundschiwingung überlagern und stören, so dass keine reine Sinusschiwingung mehr entsteht. Eine vielfache Frequenz der Grundschiwingung nennt man Oberschiwingung. Höher frequentierte Geräte(PC 150Hz) können solche Schwiwingungen ungefiltert ins Netz senden. Ein Netzanalysator von GOSSEN METRAWATT macht diese Anteile sichtbar [11, p. 295]. Sollen diese Oberschiwingungen beseitigt werden, so verwendet man spezielle **Passive Oberschiwingungsfilter(OSF)** bzw. **RC-Filter**. Diese lassen die Grundschiwingung von 50 Hz in einem bestimmten Bereich passieren. Ein **OSF** besteht aus einem **Widerstand(R)**, einem **Kondensator(C)** und oder einer **Spule(L)**. Das sind frequenzabhängige Widerstände, die den Oberschiwingungsstrom bei einer bestimmten Frequenz sperren.

Ein **Tiefpassfilter(RC-Filter)** kann mit einem RC-Glied die unerwünschten Oberschwingungen oberhalb einer bestimmten Frequenz unterdrücken/abschwächen, um ein „sauberes“ Sinussignal zu erhalten.

Ein **Bandpassfilter** besteht ebenfalls aus einem RC-Glied, lässt aber Sinusschwingungen in einem gewünschten Frequenzbereich durch.

3.2 Grundlagen der Messtechnik

Von den vielen, für den Bereich der Messtechnik relevanten Normen sind hier nur einige der grundlegenden erwähnt, auf die sich auch nachfolgende Abschnitte beziehen [15]:

- DIN 1301 Einheiten
- DIN 1304 Formelzeichen
- DIN 1313 Physikalische Größen und Gleichungen
- DIN 1319 Grundbegriffe der Messtechnik
- VDI/VDE 2600 Metrologie
- IEC 51 Direkt wirkende anzeigende elektrische Messgeräte
- IEC 359 Angaben zum Betriebsverhalten elektrischer Messeinrichtungen
- IEC 1010 Sicherheitsbestimmungen für elektrische Mess-, Steuer-, Regel-,
• und Laborgeräte
- ISO 1000 SI-Einheiten
- ISO 10012 Qualitätssicherung für Messmittel

3.2.1 Leistungsmessumformer

Zur Messung von **Blind-, Wirk- und Scheinleistung**, der Leistungsfaktoren sowie der Oberschwingungen, werden s.g. **Leistungsmessumformer(LMU)** eingesetzt. Der LMU erfasst die Augenblickswerte der Spannungen und der Ströme. So werden während einer Wechselspannungsperiode die Messwerte mehrfach erfasst und über einen **Analog-Digital-Wandler(ADC)** an einen Mikrokontroller digital übertragen, wo die Auswertung der Messwerte(rechnerunterstützt) stattfindet und am **Display** ausgegeben wird. Die Messwerte können über serielle Schnittstellen übertragen werden. Umgekehrt kann ein **Digital-Analog-Wandler(DAC)** gewünschte Werte mittels nachgeschaltetem Verstärker, an analogen Messgeräten anzeigen. Mit einer Bedieneinheit(z.B. Key-Pad) werden gewünschte Werte zum Anzeigen ausgewählt [11, p. 160].

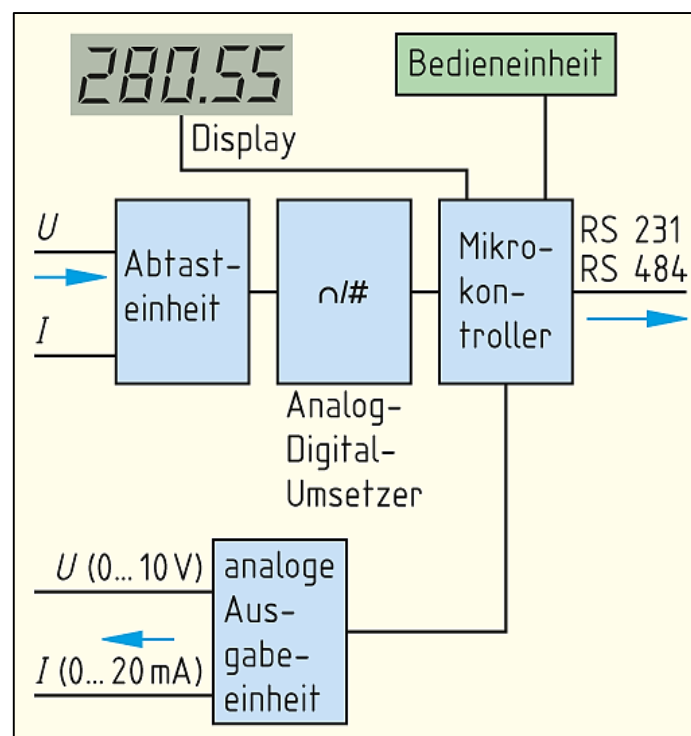


Abbildung 16: Blockschaltbild Leistungsmessumformer [11, p. 160]

3.2.2 Schaltungsarten

Für die Leistungsmessung bei Dreiphasenwechselstrom schreibt die **DIN 43807** bestimmte Messschaltungen vor [11].

Bei symmetrischer Lastverteilung ist im Drehstrom-Vierleiternetz und Dreileiternetz nur ein Leistungsmesser notwendig(**Einwattmeter-Schaltung**). Die Gesamtleistung beträgt das Dreifache der Leistungsmessung.

Bei unsymmetrischer Last im Dreileiternetz werden mit der **Aronschtaltung(Zweiwattmeter-Schaltung)** zwei Leistungsmesser benötigt. Andernfalls müssen bei Asymmetrie drei Leistungsmesser die Werte einzeln messen und zur einen Gesamtleistung summieren.

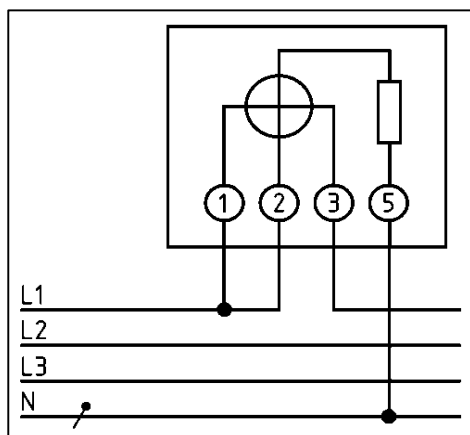


Abbildung 17:Einwattmeter-Schaltung im Vierleiter-Drehstromnetz [11, p. 160]

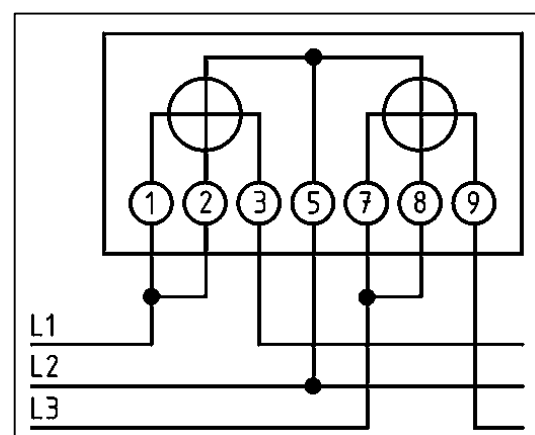


Abbildung 18: Zweiwattmeter-Schaltung oder Aronschaltung [11, p. 160]

3.2.3 Leistungsmessung

Die **DIN 1319-1** befasst sich mit den Grundlagen der Messtechnik und die **DIN EN 6005-1** beschreibt die direkt wirkende anzeigende elektrische Messgeräte und ihr Zubehör.

Zur Leistungsmessung werden digitale oder analoge Messgeräte verwendet. Die **Echt-Effektivmessung(TRMS)** spielt für das Messergebnis eine wichtige Rolle. Hat ein Messgerät die Zusatzbezeichnung **TRMS AC+DC**, so werden neben der 50-Hz-Grundschiwingung, auch Störgrößen wie die Oberschwingungen und/oder mögliche Gleichanteile aus dem Netz berücksichtigt [11, p. 189]. So kann das Messergebnis von der wirklichen Situation abweichen. Der Leistungsmessbereich des Messgerätes sollte dem zu erwartendem Messwert angepasst sein.

3.2.4 Stromwandler

Der Strom- oder der Spannungswandler zählen zu den s.g. Messwandlern, deren Wicklungsverhältnis die Ausgangsgröße bestimmt [16].

Zur indirekten Leistungsmessung werden der Wechselstrom(I) und die Wechselspannung(U) gemessen. Dabei wird der Wechselstrom von einem elektromagnetischen Feld(B) begleitet, auf das der **Stromwandler** reagiert. Der Stromwandler kann aus einem geschlossenen oder teilbaren(split core) Eisenkern mit einer Spule bestehen. Das elektromagnetische Feld induziert in der Spule des Stromwandlers eine Spannung, die proportional zu der Stromstärke ist. Diese Messtechnik benötigt wegen eingesetzter Spule ein Wechselfeld und kann daher nur beim Wechselstrom verwendet werden. Die Windungszahl(N) bestimmt die Ausgangsgröße(I).

Übersetzungsverhältnis: $K_{Strom} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$

$N_1 = 1$, weil der Leiter eine Windung darstellt

$N_2 = N$ = Windungszahl der Spule des Stromwandlers

$I_1 = I$ = Stromstärke des stromdurchflossenen Leiters

$I_2 = \frac{N_1}{N_2} * I_1 = \frac{1}{N} * I$ = Ausgangsstrom des Stromwandlers

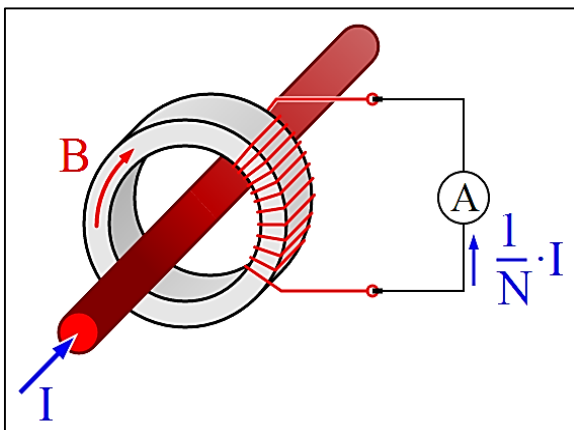


Abbildung 19: Messprinzip eines Stromwandlers [34]

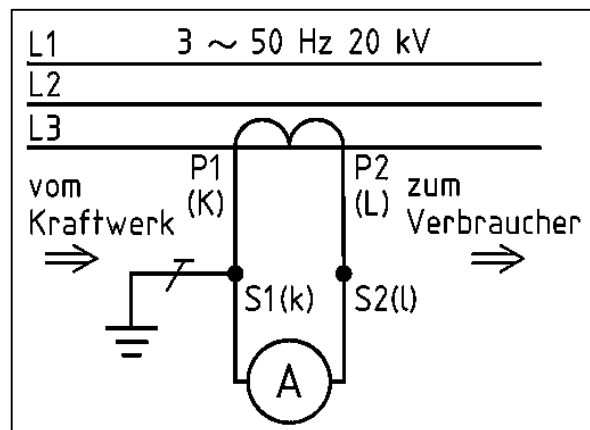


Abbildung 20: Schaltung eines Stromwandlers [11]

3.2.5 Spannungswandler

Spannungswandler sind eigentlich kleine **Transformatoren**, die man an Spannungsmesser anschließt. Diese transformieren Eingangsspannungen (Primärspule mit der Windungszahl N_1) auf eine von der windungszahlabhängigen Ausgangsspannung (Sekundärspule mit Windungszahl N_2). Ihre Bemessungsleistung beträgt zwischen 5 und 300 VA bzw. W oder var. Auf der Primärseite werden Spannungswandler gegen Überspannungsschutz durch eine zusätzliche Sicherung abgesichert [11].

$$\text{Übersetzungsverhältnis: } K_{\text{Trafo}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

U_1 = Primärspannung

U_2 = Sekundärspannung

N_1 = Primärwicklungsanzahl

N_2 = Sekundärwicklungsanzahl

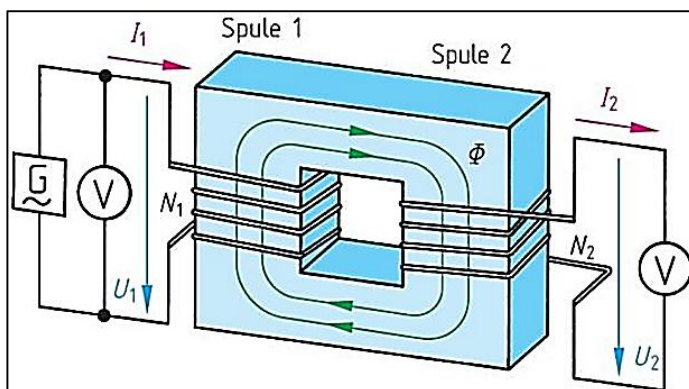


Abbildung 22: Funktionsprinzip eines Spannungswandlers [36]

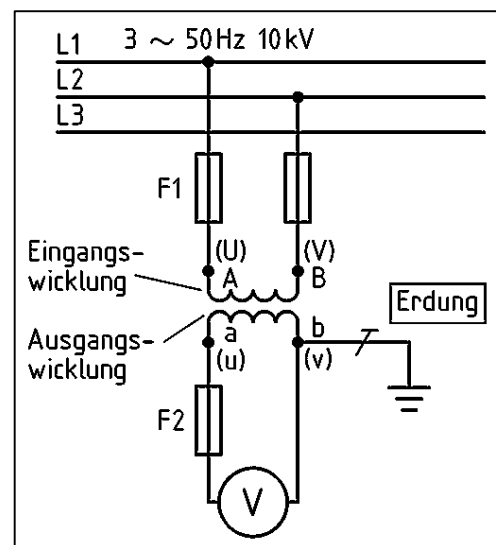


Abbildung 21: Schaltung eines Spannungswandlers [8]

3.2.6 Messkategorien

Je näher man Messung mit den Messgeräten an der Quelle durchführt, desto besser müssen diese Messwerkzeuge gegen Überspannungen an Personen gesichert sein. Die Norm EN 61010-1 teilt diese Quellen in s.g. **Messkategorien CAT1** bis **CAT4** ein. Darin wird festgelegt, bis zu welchem **Anwendungsbereich** ein Messgerät ohne Gefahr verwendet werden darf. Die **Spannungshöhe** gibt zusätzlich an, bis wieviel Volt ein Messgerät einsatzfähig ist. Entsprechen Messgeräte nicht der Messkategorie, drohen bei einem Unfall Regressforderungen [17].

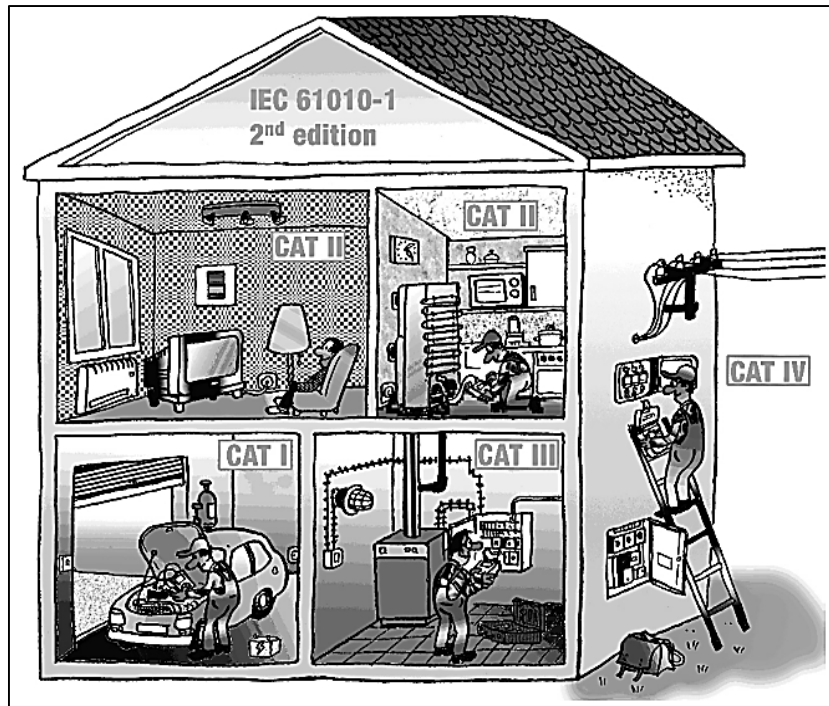


Abbildung 23: Bildliche Darstellung der Messkategorien [15]

Tabelle 2: Unterteilung der Messkategorien

Messkategorie	CAT1	CAT2	CAT3	CAT4
Messbereich und Spannungshöhe: 300/600/1000 Volt	Messungen an Stromkreisen, die nicht direkt mit dem Netz verbunden sind, z.B. Batterien etc.	Messungen an Stromkreisen, die elektrisch über Stecker direkt mit dem Niederspannungsnetz verbunden sind, z.B. in Haushalt, Büro und Labor	Messungen in der Gebäudeinstallation Stationäre Verbraucher, Verteileranschlüsse, Geräte fest am Verteiler	Messungen an der Quelle der Niederspannungsinstallation Zähler, Hauptanschluss, primärer Überstromschutz

3.2.7 Arbeiten an elektrischen Anlagen









Arbeiten an Anlagen über AC 50 Volt oder DC 120 Volt sind ausschließlich nur von Elektrofachkräften oder elektrotechnischen unterwiesenen Personen erlaubt. Dabei sind Sicherheitsvorschriften zu beachten, die in der **DIN VDE 0105** festlegt werden.

Weiterhin sind bei Prüfarbeiten an elektrischen Anlagen die **DIN VDE 0100, Teil 600** vorgeschrieben, die sich mit dem Prüfen, Besichtigen, Erproben und Messen, dem Prüfprotokoll sowie den Prüffristen beschäftigt [11].

3.2.8 IP-Schutzarten

Betriebsmittel oder Messeinrichtungen können funktionsbedingt kleine Öffnungen aufweisen. Je nach Verwendungsart und Einsatzort ist ein Berührungs- und Fremdkörperschutz sowie ein Schutz gegen das Eindringen von Wasser erforderlich. Die **DIN VDE 0470** unterteilt die Einrichtungen in s.g. **IP-Schutzarten**. Elektrische Betriebsmittel müssen mindestens Tropfwassergeschützt sein(IPX1) [11]. Wird eine Messeinrichtung hergestellt, sollte an die passende IP-Schutzart gedacht werden. Die untenstehende Tabelle hilft das verwendete Gehäuse in ihre IP-Schutzart einzuteilen.

Tabelle 3: IP-Schutzarten elektrischer Betriebsmittel [11].

Erste Ziffer	Schutzgrad: Berührungs- und Fremdkörperschutz	Bildzeichen	Zweite Ziffer	Schutzgrad: Wasserschutz	Bildzeichen		
0	Kein besonderer Schutz.	–	0	Kein besonderer Schutz.	–		
1	Schutz gegen Eindringen fester Fremdkörper mit einem Durchmesser ≥ 50 mm.	–	1	Schutz gegen senkrecht tropfendes Wasser.	tropfwassergeschützt IP X1 		
2	Schutz gegen Eindringen fester Fremdkörper mit einem Durchmesser $\geq 12,5$ mm.	–	2	Schutz gegen senkrecht tropfendes Wasser, Betriebsmittel bis 15° geneigt.	–		
3	Schutz gegen Eindringen fester Fremdkörper mit einem Durchmesser $\geq 2,5$ mm.	–	3	Schutz gegen Sprühwasser (Regen) bis zu einem Winkel von 60° zur Senkrechten.	sprühwassergeschützt (regengeschützt) IP X3 		
4	Schutz gegen Eindringen fester Fremdkörper mit einem Durchmesser ≥ 1 mm.	–	4	Schutz gegen Spritzwasser aus allen Richtungen.	spritzwassergeschützt IP X4 		
5	Schutz gegen Staubablagerung (staubgeschützt). Vollständiger Berührungsschutz.	staubgeschützt IP 5X 	5	Schutz gegen Strahlwasser (Düse) aus allen Richtungen.	strahlwassergeschützt IP X5 		
6	Schutz gegen Eindringen von Staub (staubdicht). Vollständiger Berührungsschutz.	staubdicht IP 6X 	6	Schutz gegen starken Wasserstrahl oder schwere See.	–		
Wird neben den Kennbuchstaben IP nur eine Kennziffer für den Schutzgrad benötigt, so ist anstelle der fehlenden Kennziffer ein X zu setzen, z. B. IP X4 oder IP 3X.			7	Schutz gegen Wasser bei Eintauchen des Betriebsmittels unter Druck-, Zeitbedingungen.	wasserdicht IP X7 		
			8	Schutz gegen Wasser bei dauerndem Untertauchen des Betriebsmittels.	druckwasserdicht IP X8  ...bar		
<p>IP-Kennzeichnung durch nachgestellte Buchstaben:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>1. Buchstabe</p> <p>A Schutz gegen Zugang mit dem Handrücken</p> <p>B Schutz gegen Zugang mit dem Finger</p> <p>C Geschützt gegen Zugang mit Werkzeugen</p> <p>D Geschützt gegen Zugang mit Draht</p> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>2. Buchstabe</p> <p>H Betriebsmittel für Hochspannung</p> <p>M Geprüft auf Wassereintritt bei laufender Maschine</p> <p>S Geprüft auf Wassereintritt bei stehender Maschine</p> <p>W Geeignet bei festgelegten Witterungsbedingungen</p> </td> </tr> </table>						<p>1. Buchstabe</p> <p>A Schutz gegen Zugang mit dem Handrücken</p> <p>B Schutz gegen Zugang mit dem Finger</p> <p>C Geschützt gegen Zugang mit Werkzeugen</p> <p>D Geschützt gegen Zugang mit Draht</p>	<p>2. Buchstabe</p> <p>H Betriebsmittel für Hochspannung</p> <p>M Geprüft auf Wassereintritt bei laufender Maschine</p> <p>S Geprüft auf Wassereintritt bei stehender Maschine</p> <p>W Geeignet bei festgelegten Witterungsbedingungen</p>
<p>1. Buchstabe</p> <p>A Schutz gegen Zugang mit dem Handrücken</p> <p>B Schutz gegen Zugang mit dem Finger</p> <p>C Geschützt gegen Zugang mit Werkzeugen</p> <p>D Geschützt gegen Zugang mit Draht</p>	<p>2. Buchstabe</p> <p>H Betriebsmittel für Hochspannung</p> <p>M Geprüft auf Wassereintritt bei laufender Maschine</p> <p>S Geprüft auf Wassereintritt bei stehender Maschine</p> <p>W Geeignet bei festgelegten Witterungsbedingungen</p>						

4 Entwicklung der Leistungsmesseinrichtung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung der mobilen Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung, die im industriellen Einsatz verwendet werden soll.

In der Theorie werden zur Leistungsbestimmung die Messgrößen von Strom und Spannung benötigt. Mit zusätzlicher Messung der Phasenverschiebung lassen sich daraus alle gesuchten Leistungsarten bestimmen.

4.1 Konzeptentwicklung

Bei der **Konzeptentwicklung** wird zunächst das Problem der Leistungsmessung in den Mittelpunkt gestellt. Die Marktanalyse hilft bei der Suche nach Lösungsansätzen. So sollte die Messeinrichtung kostengünstig und leicht zu bedienen sein.

Bei der Konzeptsuche sollte eine Anforderungsliste helfen die Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung zu entwickeln und gleichzeitig als Richtlinie dienen. So sollten als wichtige Merkmale der Preis und der sichere Umgang mit der Einrichtung berücksichtigt werden.

Das Internet half bei der Suche nach einer Idee bzw. einem Grundkonzept. In den Internet-foren zeigen Hobbybastler ihre Lösungsansätze für bestimmte Probleme. So findet man auf www.elektronik-kompodium.de einige Anregungen und Ideen, die bei der Konzeptentwicklung weiter halfen [18].

Eine gute Adresse für Bau- und Elektronikanleitungen bietet www.elv.de. Dort findet man unzählige Anleitungen, die man zum Teil als kostenlose PDF herunterladen kann [19]. Eine der wichtigsten Ideen lieferte dabei das ELV-Journal 6/95, das den Bau eines Analog-Multiplizierers beschreibt, der zur Leistungsmessung verwendet werden kann. Auch das Leistungsmessgerät LMG 7000 vom gleichnamigen ELV-Journal 32/33, hat zudem eine Anleitung samt Schaltplan und Platinen-Layout, zum Bau eines Leistungsmessgerätes. Der Artikel aus dem elektronischen ELV-Journal kann gegen eine Gebühr heruntergeladen und darf daher in dieser Arbeit nicht veröffentlicht werden.

Ein relativ neues Konzept stellt ebenfalls ELV auf ihrer Internetseite vor. Dabei übernimmt ein Chip die Leistungsauswertung, der einen Analog-Front-End-IC CS5490 verwendet. Dieser Baustein hat zwei schnelle 24-Bit-ADCs, die Spannung und Strom mit 4 kHz abtasten(messen)

und über ein integriertes Rechenwerk verarbeiten [20] [21]. Die gesamte Beschreibung des CS5490 sowie die Anwendungsgebiete können auf www.cirrus.com heruntergeladen werden.

4.1.1 Anforderungsliste

Durch die Aufgabenstellung und daraus resultierenden Problemstellung haben sich Anforderungen an das Konzept und folglich an die Messeinrichtung ergeben, dessen Vorgaben erfüllt werden sollten. Die Anforderungsliste umfasst die wesentlichen Punkte, an die mobile Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung. **F= Forderung(muss) W= Wunsch(kann)**

Tabelle 4: Anforderungsliste

Anforderungsliste	F oder W
Einfache Installation des Messaufbaus	W
Handliche mobile Einrichtung	F
Funktionsfähigkeit auch bei Stromausfall	F
Datenaufzeichnung mit Zeitstempel	F
Externe Datenverarbeitung der Datenaufzeichnung	F
Digitale Anzeige	F
Anzeigen der Wirk-, Schein- und Blindleistung	F
Anzeigen der Phasenverschiebung	W
Ausgelegt für 230 Volt(effektiv) Vierleiter-Drehstromnetz	F
Kostengünstige Bauelemente	W
IP-Schutzklassen einbeziehen	F
Messbereich bis 100 Ampere pro Leiter	W
Sicherer Umgang bei der Bedienung	F

4.1.2 3-A-Prinzip

Bei der Konzeptentwicklung wurde ein Muster gefunden, welches immer wieder nach demselben Prinzip abläuft. So werden bei der Leistungsmessung der Strom und die Spannung gemessen, dessen gesuchte Ergebnisse ausgewertet und anschließend zur Kontrolle optisch ausgegeben. Die grundlegenden Prinzipien wurden daher auch das 3-A-Prinzip genannt.

Die drei Konzepte verlaufen grundlegend nach dem **3-A-Prinzip**:

1. **Ausmessen**: Messen der Strom- und Spannungswerte
2. **Auswerten**: Zusammenführen der Messwerte zu aussagekräftigen Ergebnissen
3. **Ausgeben**: Anzeigen der Messergebnisse auf einer Analog- oder Digital-Anzeige.



Abbildung 24: 3-A-Prinzip

Nach dem aus dem großen Wissenspool der Ideen in der Hochschule der Professoren, dem Internet sowie zahlreichen Fachzeitschriften geschöpft wurde, begann die eigentliche Entwicklung eigener Konzepte für eine mögliche Leistungsmesseinrichtung.

Bei der Konzeptentwicklung sind drei mögliche Lösungsansätze gefunden worden. Die Konzeptnamen entsprechen ihrer Entstehungsgeschichte und lauten

- **das Analog-Konzept,**
- **das Digital-Konzept und**
- **das Analog-Digital-Konzept,**

die im nachfolgenden Abschnitt beschrieben werden.

4.1.3 Das Analog-Konzept

Das **Analog-Konzept** verwendet vorwiegend analoge Bauelemente, daher auch der gewählte Namen. Es ist die Technik der achtziger Jahre. Den Lösungsansatz lieferte dabei das bereits erwähnte ELV-Journal. In dem Konzept werden Spannungswandler, Stromwandler, Operationsverstärker(OPV), Schaltregler verwendet, die alle auf einer Platine so verschaltet, werden, dass ein Ergebnis z.B. der Leistung pro Anzeige zu sehen ist.

Die Leistung wird indirekt ermittelt. Der Messwert über den Spannungswandler und Stromwandler erfasst. Die Auswertung beruht ausschließlich auf der Technik der integrierten Schaltkreise. Das Anzeigen der Leistungswerte erfolgt permanent auf mehreren Anzeigen.

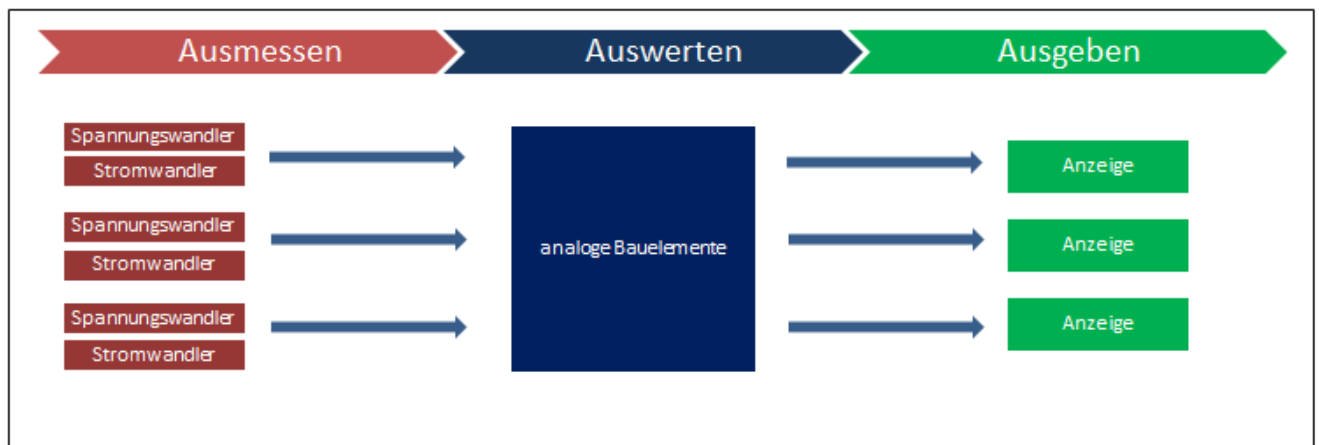


Abbildung 25: Blockschaltbild Analog-Konzept

Tabelle 6: Vorteile/Nachteile Analog-Konzept

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • galvanische Trennung • keine Entwicklungszeit • kostengünstige Bauteile • Schaltpläne und Layout vorhanden • Erprobt und altbewährt • Keine Programmierkenntnisse 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Datenaufzeichnung • Keine Datenübertragung • Beschränkt/Nicht Erweiterungs-fähig • Viele Bauteile zum Löten • Keine Blindleistungsanteile • Kein Wirkfaktor • Analoge Auswertung • Aufwendige Herstellung

4.1.4 Das Digital-Konzept

Das Digital-Konzept verwendet vorwiegend digitale Bauelemente. Es ist die Technik der digitalen Neuzeit und beruht auf der Methode eines Leistungsmessumformers. So könnte dafür ein schneller 24-Bit-Chip CS5490 verwendet werden. Das Datenblatt mit seinen Beschaltungsdetails können wie bereits erwähnt auf www.cirrus.com heruntergeladen werden.

Die indirekte Leistungsmessung geschieht mit einem Stromwandler und Spannungsteilern. Die Berechnung und Auswertung wird mit dem CS5490 durchgeführt und an einen MC übergeben. Dort werden die Werte aufgearbeitet und auf der Anzeige ausgegeben.

Alternativ kann auf den CS5490 verzichtet werden, sodass nur mit dem MC gearbeitet wird. Der MC arbeitet ausschließlich mit positiven Spannungswerten, die auch sinusförmig sein können. D.h. die negativen Anteile des Drehstromes müssen über das Null-Potential gebracht werden, welche mit einer vorgeschalteten Offset-Schaltung geschieht. Ein ADC übergibt die Werte an den MC, der je nach Rechenleistung die ausgewählten Werte auf einer Anzeige ausgibt.

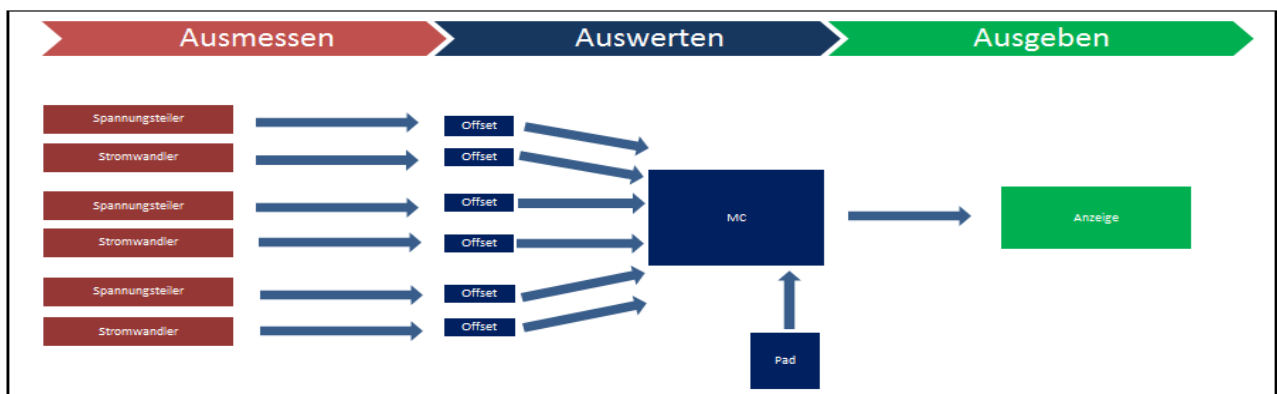


Abbildung 27: Blockschaltbild Digital-Konzept

Tabelle 7: Vorteile/Nachteile Digital-Konzept

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Datenübertragung • Erweiterungsfähig • Alle Leistungswerte darstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine galvanische Trennung(Unsicher) • Offset-Schaltung notwendig • Programmierkenntnisse erforderlich • Lange Entwicklungszeit • Keine externe Datenspeicherung • Polrichtung beim Spannungsteiler

4.1.5 Das Analog-Digital-Konzept

Das Analog-Digital-Konzept ist eine Mischung aus den zuvor vorgestellten Konzepten. Dabei wird die analoge mit der digitalen Technik so kombiniert, dass die „bestmögliche“ Lösung herauskommt.

Hierbei wird auf dem UI-Interface die Strom und Spannungswerte zusammengeführt, die zuvor mit galvanisch getrennten Messwandlern erfasst wurden. Die analogen Werte werden über einen ADC digitalisiert mit dem MC verarbeitet und gespeichert(SD-Card). Das Ziffernblock(Pad) erlaubt eine Auswahl der anzuzeigenden Werte am LCD(Anzeige).

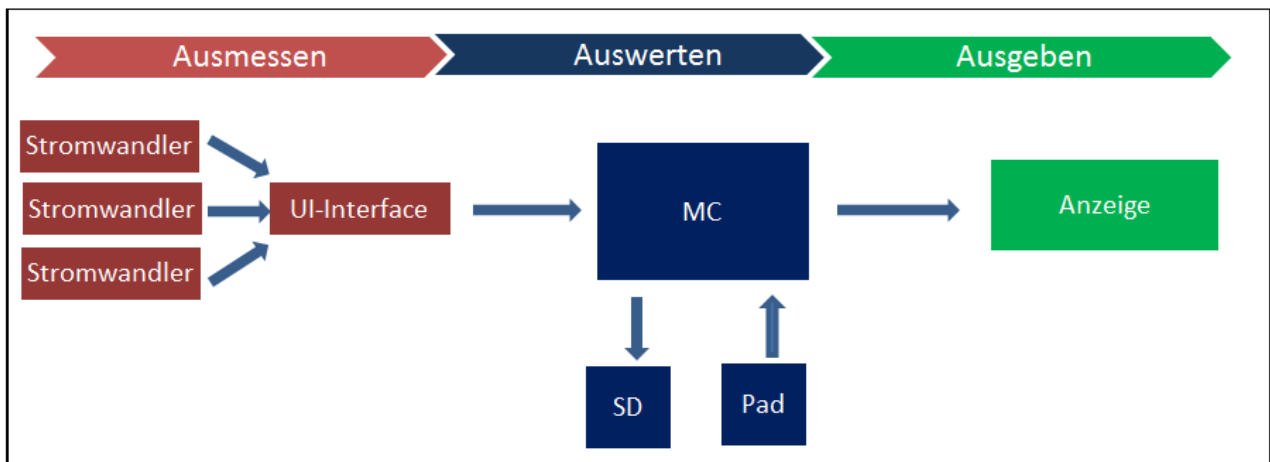


Abbildung 29: Blockschaltbild Analog-Digital-Konzept

Tabelle 8: Vorteile/Nachteile Analog-Digital-Konzept

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Datenspeicherung • Datenübertragung • Erweiterungsfähig • Alle Leistungswerte darstellbar • Galvanische Trennung • Langsamer Prozessor möglich • 1 ADC notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> • MC Prozessorabhängig) • Programmierkenntnisse erforderlich • Längere Entwicklungszeit • Langsamer ADC • Einsatzbereich begrenzt auf 230V~ • MC Prozessorabhängig) • Programmierkenntnisse erforderlich • Längere Entwicklungszeit • Langsamer ADC • Einsatzbereich begrenzt auf 230V~

- 1 AD-Wandler

4.2 Entwicklung, Schaltplan und Layout

Nach dem das Analog-Digital-Konzept am sinnvollsten erschien, sollte zur Entwicklung des Leistungsmesseinrichtung, die dafür notwendigen technische Komponenten vorbereitet werden.

Zum Bau der Einrichtung gehörten auch die Recherche nach Komponenten, die zugekauft werden können und die Vorüberlegung, welche selbst hergestellt werden müssen. Zur Entwicklung der Schaltpläne und zum Programmieren des Arduinos wurde nach passender Software gesucht. Weiter wurden Informationen aus den Datenblättern und hilfreichen Artikeln gesucht und zusammengetragen.

So gaben die Datenblätter der Hersteller, Foren für Elektrotechnik und Fachbücher wie Halbleiter-Schaltungstechnik von Tietze und Schenk [22], den nötigen Faden während der Entwicklungszeit.

4.3 Verwendete Komponenten

Für die Entwicklung der Messeinrichtung wurden Komponenten zugekauft, die nicht selber hergestellt werden sollten. Nachfolgend werden die wichtigsten Merkmale dieser Komponenten vorgestellt.

4.3.1 Software

Software für die Schaltpläne und das Layout

Zum Entwickeln von Leiterplatten, anhand von Schaltplänen und der Layouts, wird eine spezielle Software mit dem Namen EAGLE der früheren Fima CadSoft verwendet. Die Abkürzung bedeutet **E**infach **A**nzuwendender **G**rafischer **L**ayout-Editor (engl.: **E**asily **A**pplicable **G**raphical **L**ayout **E**ditor) [23]. Eine kostenlose Version kann im Internet heruntergeladen werden.

Software für den Arduino Mega

Die Entwicklungsumgebung(IDE) bzw. die verwendete Software von dem Arduino ist eine auf C/C++ basierte Programmiersprache. Die IDE kann auf www.arduino.org kostenlos heruntergeladen werden. Die Open-Source-Befehle bzw. Bibliotheken können lizenzfrei verwendet werden. Einige der Bibliotheken sind unter www.funduino.de oder www.arduino.cc erhältlich [24] [25]. Es ist eine kostenlose Entwicklungsumgebung, die mit ihren Bibliotheken ständig durch ihre große Internetcommunity weiterentwickelt und erweitert werden. Die bereits entwickelten Bibliotheken reduzieren erheblich den Programmieraufwand.

4.3.2 Stromwandler

Zum Messen der Stromwerte wird ein teilbarer(split core) Stromwandler der Firma YHDC verwendet, der den Vorteil der galvanischen Trennung mitbringt. Der Messbereich beträgt auf der Eingangsseite bis 100 A und auf der Ausgabeseite bis 50 mA. Der maximale messbare Leiterdurchmesser umfasst 13 mm. Technische Details und weitere Ausführungen sind dem Anhang zu entnehmen.



Abbildung 31: Stromwandler

4.3.3 Spannungswandler

Die Erfassung der Spannungswerte erfolgte mit einem Spannungswandler(Transformator) mit galvanischer Trennung, der die Spannung von 230 auf 2,3 Volt herabsetzt. Die Nennlast liegt bei 1 VA. Dieser Spannungswandler wird auf dem UI-Interface integriert.



Abbildung 32: Spannungswandler

4.3.4 Arduino Mega

Für die Datenauswertung wurde ein Arduino Mega, nachfolgend nur Arduino genannt, mit einem 8-Bit-Prozessor von ATmega2560 verwendet. Der Arduino besitzt einen 10-Bit-ADC auf dem Board, über den er bis zu 16 analoge Spannungswerte von 0 bis 5 Volt verarbeiten kann.

Der Betriebsbereich liegt zwischen 5 und 12 Volt(DC). Auf dem Board befinden sich neben I²C auch SPI und serielle Schnittstellen. Bei weiterem Interesse über technische Ausführungen, sowie Einsatzmöglichkeiten, liefert die Internetseite www.arduino.cc weitere Auskunft.

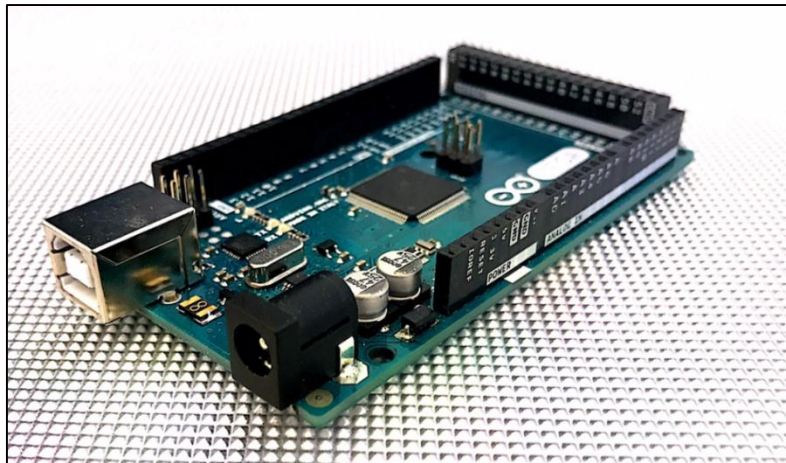


Abbildung 33: Mikrokontroller Arduino Mega

4.3.5 Liquid-Crystal-Display(LCD)

Ein extra großes 20x4(SpaltenxZeilen) blaues LC-Display dient als Ausgabe und erleichtert mit großen hintergrundbeleuchteten weißen Zeichen das Ablesen der Werte. Ein zusätzliches I²C-Modul wird auf der Rückseite des LCDs gelötet und über die I²C-Schnittstelle des Arduinos verbunden. Das Modul ermöglicht das Empfangen von Daten mit weniger Datenkabeln. Der Arduino braucht hierfür eine spezielle I²C-Bibliothek, die im Programmcode implementiert wird. Die Stromversorgung von 5 Volt(DC) erfolgt über den Arduino. Technische Details liefern zahlreiche Internetanbieter auf ihren Internetseiten.



Abbildung 35: LCD 20x4



Abbildung 34: I²C-Modul der LCD-Rückseite

4.3.6 SD-Card-Modul

Ein kostengünstiges und einfaches Modul, welches zur externen Datenspeicherung dient, ist das SD-Card-Modul. Dieses Modul wird über eine SPI-Schnittstelle mit dem Arduino verbunden, der hierfür ebenfalls eine spezielle SPI-Bibliothek verwendet. Das Modul benötigt 3,3 Volt zur Datenübertragung und 5 Volt zur Spannungsversorgung, die ebenfalls der Arduino liefert.

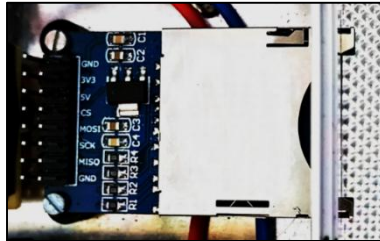


Abbildung 36: SD-Card-Modul

4.3.7 SD-Card

Die SD-Card wird zum Speichern der Messwerte benötigt. Um ausreichend Speicherplatz zu haben, wird eine 16GB große Speicherkarte verwendet. Die Karte wird in das SD-Card-Modul gesteckt und bei Bedarf nach dem Messen zur Datenanalyse wieder entfernt.



Abbildung 37: SD-Card 16GB

4.3.8 Sub-D-Stecker

Der Sub-D-Stecker ist ein vielfach verwendeter Stecker in der Nachrichtentechnik. Dieser wird häufig zum Übertragen von seriellen Daten(RS232) verwendet, für die er in diesem Fall 9 Pole hat. Der Stecker wird zwischen männlich und weiblich unterschieden. Weitere Details zu diesem Stecker werden im Kapitel Herstellung erläutert.



Abbildung 38: Sub-D-Stecker
(oben männlich und unten weiblich)

4.3.9 Key-Pad(Bedienfeld)

Das verwendete Bedienfeld wird auch Key-Pad genannt. Es ist eine 4x4 Tastatur, die aufgeklebt wird. Eine Zahlenbelegung von 0-9, die Sonderzeichen * und #, sowie die Buchstaben A, B, C und D, können für weitere Programmierzwecke beliebig belegt und mit dem Arduino verwendet werden.



Abbildung 39: 4*4 Key-Pad

4.3.10 LiPo-Akku

Bei Stromausfall dient zur Spannungsversorgung ein LiPo-Akku mit 2500mAh. Der Akku bietet eine 7,4 Volt Spannungsquelle für den Arduino und andere Hardware bzw. Komponenten.



Abbildung 40: LiPo-Akku, 7,4 Volt

4.3.11 Gehäuse nach IP-Schutzart-Klassifizierung

UI-Gehäuse

Für das UI-Gehäuse wird ein schwarzes Kunststoffgehäuse verwendet. Es besitzt Lüftungsschlitze, um die Wärme abzuführen [27]. Laut IP-Klassifizierung nach IP-Schutzart-Tabelle wird dieses in IP41 eingestuft.



Abbildung 41: UI-Gehäuse IP41

Mess-Gehäuse

Das helle Mess-Gehäuse soll gut mit einer Hand festzuhalten und mit der anderen Hand bedienbar sein. Es wird vor dem Verarbeiten in die IP-Schutzklasse IP65 [26] und nach dem Einbau der Komponenten in IP54 klassifiziert.



Abbildung 42: Mess-Gehäuse IP54

Im Weiteren wird die eigentliche Entwicklung der Leistungsmesseinrichtung vorgestellt. Dazu werden die selbstständig entwickelten Schaltpläne vorgestellt und erläutert. Die Funktionsbereiche sorgen für eine übersichtliche Einteilung der Einrichtung nach ihren technischen Funktionsaufgaben.

4.3.12 UI-Interface

Die Hauptaufgabe des UI-Interface ist es alle Strom- und Spannungseingänge auf einer einzigen Platine zu vereinen. Der Name steht für **U**=Spannung, **I**=Strom und **Interface**=Schnittstelle.

Das UI-Interface filtert die Störgrößen und reduziert die Wechselfrequenz auf ein ungefährliches Niveau und verhindert durch die galvanische Trennung gefährlicher Wechselfrequenz in das System.

Der Schaltplan für das UI-Interface wird in Funktionsbereiche(FB) eingeteilt. Die verwendeten elektronischen Bauelemente werden dabei zu Gruppen zusammengefasst und erläutert. Der gesamte Schaltplan ist dem Anhang zu entnehmen.

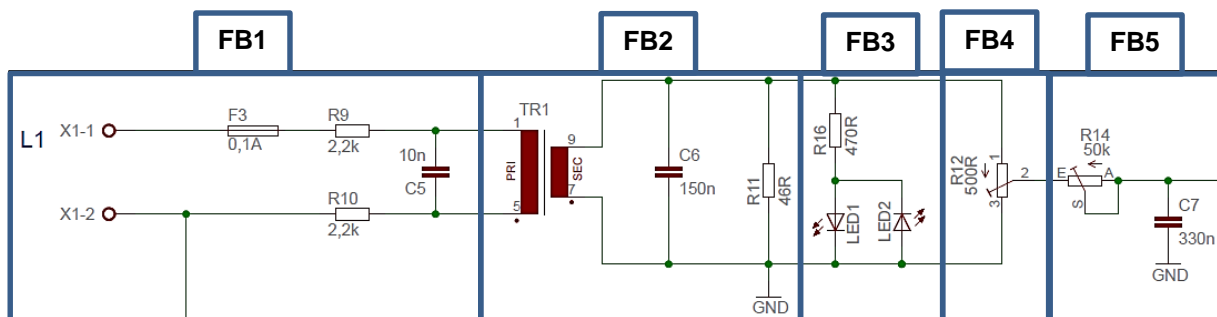


Abbildung 43: Ausschnitt Schaltplan UI-Interface

FB1-> Sicherung + Tiefpassfilter

Die Wechselspannung(X1-1) geht über die Sicherung(F3) an den passiven RC-Tiefpassfilter(R9+R10+C5). Der N-Leiter(X1-2) ist die Rückleitung. Die Sicherung wird mit 0,1A abgesichert.

$$S = U * I \rightarrow I = \frac{S}{U} = \frac{1VA}{230V} = 4mA$$

Wegen dem Rush-Effekt kann der Einschaltstrom das 20-fache betragen, daher wählt man eine 0,1A-Sicherung aus[Rush-Effekt im Skript von H. J. Köppen, HAW Hamburg].

$$\rightarrow 4mA * 20 = 80mA$$

\rightarrow Der nächste Normwert beträgt 100mA = **0,1A(Sicherung)**

Der Tiefpassfilter als RC-Glied, bestehend aus R9, R10 und C5 mit R=R9+R10=4,4kΩ und C=C5=10nF ergibt für die Grenzfrequenz fg

$$fg = \frac{1}{2\pi * R * C} = \frac{1}{2\pi * 4,4k\Omega * 10nF} = 4kHz$$

Die Grenzfrequenz ist deshalb so groß gewählt worden, damit bei 50Hz die Phasenverschiebung nahezu 0 Grad beträgt. Es ist ein Vorfilter, der die hochfrequenten Störgrößen(Spikes) begrenzt [22, p. 1725] [2, p. 80].

FB2 -> Transformation

Hier wandelt der Transformator(TR1) die Primärwechselspannung(PRI) von 230 Volt auf die Sekundärwechselspannung(SEC) von 6 Volt um.

$$\ddot{u} = \frac{U1}{U2} = \frac{230V}{6V} = 38,33$$

Es gibt nur ganzzahlige Wicklungsverhältniszahlen(ü), daher werden die 6 Volt Sekundärspannung höher ausfallen, wenn das Verhältnis 38 beträgt. Der Kondensator(C6) bildet mit dem sekundären Wicklungswiderstand des Transformators einen Tiefpassfilter, der ebenfalls hochfrequente Störgrößen filtert.

Der Lastwiderstand(R11) mit 46 Ohm soll die sekundärseitig abgegebene Wirkleistung des Transformators aufnehmen.

$$P = U * I = \frac{U^2}{R} = \frac{6^2V}{46\Omega} = 0,8W$$

Der Lastwiderstand nimmt hierbei nur 0,8 Watt auf, die restliche Wirkleistung von 0,2 Watt, wird über R16 und R12 in Wärme umgesetzt.

Der Transformator selbst verursacht bei unterschiedlichen Betriebszuständen eine veränderliche Phasenverschiebung. Diese Erkenntnis wurde bei Messdurchführungen festgestellt, die hier nicht weiter erläutert wird.

FB3 -> Kontrollleuchte

Die beiden LEDs(LED1 und LED2, Schwellspannung von 1,8V) zeigen an, dass Leiterspannung anliegt. Der Widerstand(R16) sorgt für die Strombegrenzung(Ig).

$$I_g = \frac{6V - 1,8V}{470\Omega} = 8,9mA$$

Es sind zwei LEDs notwendig! LED1 lässt nur die positiven Halbwellen und die LED2 nur die negativen Halbwellen durch. Nur eine LED eingesetzt, würde durch die unsymmetrische Belastung eine Phasenverschiebung selbst erzeugen, die man vermeiden soll.

FB4 -> Spannungsteiler

Der verstellbare Widerstand(R12) bildet mit seinen 500 Ohm und der nachgelagerten Widerständen auf der Messkarte einen Spannungsteiler. Man benutzt den Widerstand, um die Wechselspannung auf 1 Volt zu begrenzen. Dieses würde 230 Volt der Wechselspannung auf der Primärseite entsprechen. Auf der Messkarte wird die 1 Volt Wechselspannung gleichgerichtet und parallel dem Komparator zur Verfügung zu gestellt.

FB5 -> Phasenverschiebung

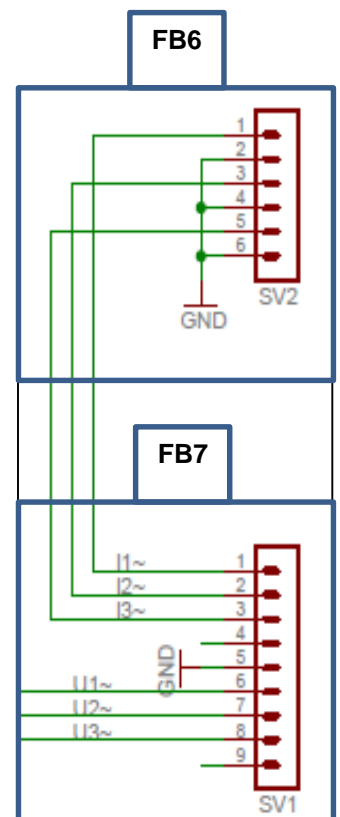
Die durch den Trafo verursachte Phasenverschiebung kann durch den verstellbaren Widerstand(R14) und dem Kondensator(C7) kompensiert bzw. reguliert werden(Grenzfrequenz mit einem Tiefpassfilter einstellen [22, p. 1724]. Der Abgleich in FB4 erfolgt so, dass 1 Volt am Ausgang von FB5 bei 230 Volt am Eingang von FB1 anliegen.

FB6 -> Stromwandler

Der Wechselstrom(I_{\sim}) wird über drei Stromwandler aus Kapitel 5.3.2, die sekundärseitig Wechselstrom ausgegeben, auf dem UI-Interface mit dem Stecker2(SV2) vereint, der die Ströme an den Stecker1(SV1) weiterleitet.

FB7 -> UI-Übertragung

Der Stecker2 bekommt die Messwerte $U1_{\sim}$, $U2_{\sim}$, $U3_{\sim}$, $I1_{\sim}$, $I2_{\sim}$ und $I3_{\sim}$ und leitet diese über den 9-polige Sub-D-Stecker an die Messkarte weiter.



4.3.13 Messkarte

Die Hauptaufgabe der Messkarte besteht darin, die zuvor erhaltenen Werte aus dem UI-Interface in Größen umzuwandeln, die der Mikrocontroller verarbeiten kann.

Die Messkarte filtert auch die restlichen Störgrößen und wandelt die Wechselgrößen in Gleichspannungen um. Des Weiteren werden die Nulldurchgänge der Wechselgrößen ermittelt und die Differenz gebildet, woraus die Phasenverschiebung und somit der Wirkfaktor als Gleichspannung an analog Eingängen des Arduinos übergeben wird.

Wie zuvor auch, unterteile man die Messkarte in ihre Funktionsbereiche auf. Der Ausschnitt stellt einen Teil des Schaltplanes der Messkarte vor.

Die meisten Beschaltungen wurden aus den Datenblättern der jeweiligen ICs auf www.ti.com entnommen.

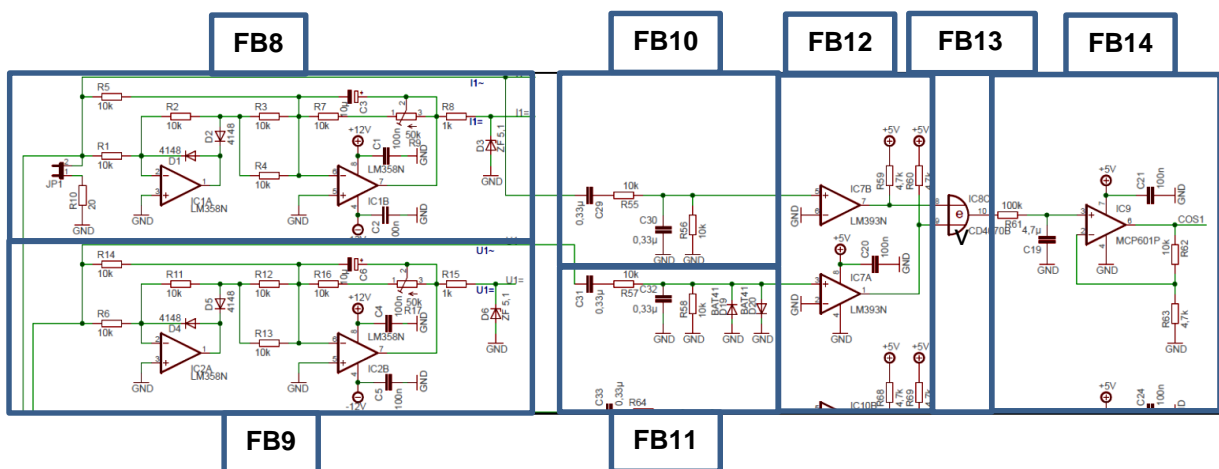


Abbildung 44: Ausschnitt Schaltplan Messkarte

Die Wechselspannungen sowie Wechselströme werden von dem UI-Interface nach FB8 und FB9 über die zwei Leitungen weitergeleitet, die links in der obigen Abbildung zu sehen.

FB8 -> Messgleichrichter für Strom(AC-DC-Converter)

Zur Messung von Strom, wird zu dem Strommesswiderstand(R10), auch als Shunt bezeichnet, ein Jumper(JP1) vorgeschaltet. Der Shunt wird mit 20 Ohm gewählt. Damit kann der Strom proportional zur Spannung angesehen werden ($I \sim U$) [22, p. 1046]. Bei der Gleichrichtung wird eigentlich die Wechselspannung, die über den Shunt abfällt gleichgerichtet und nicht der Strom!

Ein Messgleichrichter wandelt durch zwei Vorgänge die Wechselgrößen in Gleichgrößen um. Es handelt sich um einen Zweiweg-Präzisions-Gleichrichter. Der Schaltaufbau wurde dem Datenblatt des Herstellers für den LM358N(IC1) entnommen. Die Theorie dahinter wird in der Fachliteratur Halbleiter-Schaltungstechnik erklärt [22, p. 1053].

Mit dem Elektrolytkondensators(C3=10 μ F) wird der Op(IC1B) zum Tiefpass-Filter 1.Ordnung. Die Grenzfrequenz(f_g) von dem RC-Glied sollte gegenüber der Signalfrequenz(50Hz) klein gewählt werden, damit man am Ausgang möglichst eine reine Gleichspannung(\bar{U}_a) erhält.

$$f_g = \frac{1}{2 * \pi * R7 * C3} = \frac{1}{2 * \pi * 10k\Omega * 10\mu F} = 1,6 \text{ Hz}$$

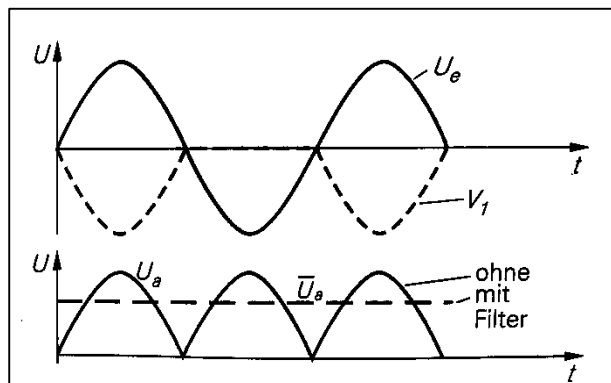


Abbildung 45: Spannungsverlauf(U_a) bei sinusförmigen Eingangsspannung(U_e) [20, p. 1055]

Mit dem verstellbaren Widerstand(R9) wird die Verstärkung des zweiten Ops(IC1B) eingestellt und somit das Größenverhältnis zwischen Amplitude/Effektivwert der Eingangsspannung und der gleichgerichteten Ausgangsspannung.

Zur Spannungsbegrenzung wird eine Zener-Diode(D3) verwendet, damit der ADC des Arduinos geschützt wird [22, p. 24]. Die Kondensatoren(C1+C2) werden zum Entstören eingesetzt.

FB9 -> Messgleichrichter Spannung

Die Messgleichrichtung für die Wechselspannung erfolgt gleichermaßen wie für den Strom aus FB8, nur dass hier kein Shunt verwendet wird.

FB10 -> Bandpassfilter

Der Bandpassfilter(C29+R55+C30+R56), auch Wien-Glied genannt, verwendet man um definierte Signale und Frequenzen für einen gewünschten Bereich zu erhalten.

$$f_r = \frac{1}{2 * \pi * R * C} = \frac{1}{2 * \pi * 10k\Omega * 0,33\mu F} = 50Hz$$

Für die Resonanzfrequenz gilt, die Phasenverschiebung ist Null, die Verstärkung A_r und die Güte Q ist $1/3$ [22, p. 1732].

$$Q = \frac{1}{3} = \frac{f_r}{B} \rightarrow B = 3 * f_r = 3 * 50Hz = 150Hz$$

$$B = 3 * f_r = f_{go} - f_{gu} = 150Hz$$

$$f_{gu} = \frac{1}{3,3} * f_r = \frac{1}{3,3} * 50Hz = 15,2 Hz$$

$$f_{go} = 3,3 * f_r = 3,3 * 50Hz = 165 Hz$$

Die Bandbreite beträgt 150 Hz und die Mittenfrequenz bzw. Resonanzfrequenz 50Hz [3].

FB11 -> Bandpassfilter + Spannungsbegrenzung

Dieser Funktionsbereich unterscheidet sich zum vorigen durch die beiden Schottky-Dioden(D19/D20). Die Dioden begrenzen die Wechselspannung in positive und negative Richtung auf +/- 0,3 Volt, damit der nachfolgende Komparator Signale zum Verarbeiten erhält, die er nur in diesem Bereich verarbeiten kann.

FB12 -> Rechteckformung

Der Operationsverstärker(IC7) LM393N formt im Niederfrequenzbereich die Wechselsignale in Rechtecksignale um. Der IC7 hat eine hohe Verstärkung und keine Rückkopplung.

Für die Strom- und Spannungsmessung wird jeweils ein Rechtecksignal erzeugt und zum nachfolgenden Vergleichs(FB13)ausgegeben [22, p. 865].

FB13 ->Vergleicher EXOR

Der Exklusiv-Oder-Gatter(IC8) CD4070B wird zum logischen Vergleichen zweier Signale verwendet.

Der EXOR vergleicht Signal A(Input A) mit dem Signal B(Input B) und wertet die Signale mit einer Exklusiv-Oder-Funktion [20, p. 620] aus. Die Schnittmenge der Rechtecksignale(EXOR Output) entspricht dem Wert der gesuchten Phasenverschiebung.

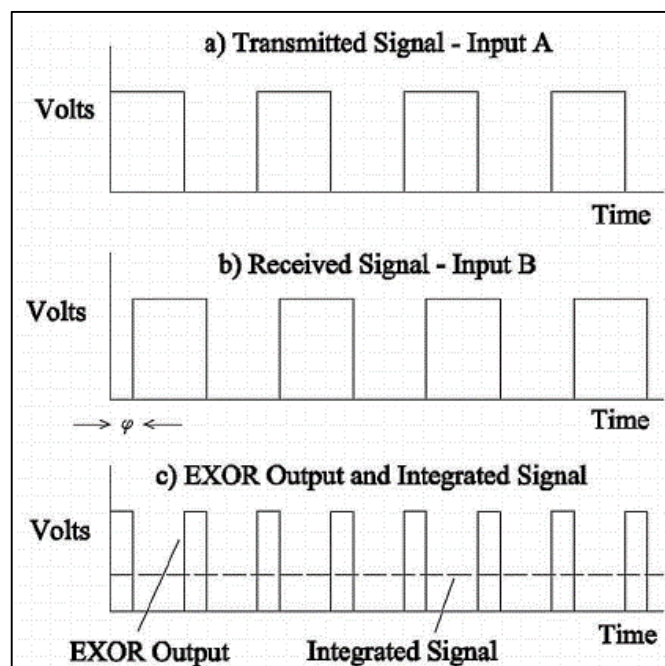


Abbildung 46: Signalverlauf EXOR-Gatter [28]

FB14 -> Mittelwertverstärker

Die erzeugten Rechtecksignale aus dem EXOR müssen zur Weiterverwendung umgeformt und verstärkt werden.

Die Rechtecksignale werden durch ein Tiefpassfilter(R61+C19) in einen konstanten Mittelwert [22, p. 1726] umgeformt, dessen Höhe ein Maß für die Phasenverschiebung ist.

$$f_g = \frac{1}{2 * \pi * R61 * C19} = \frac{1}{2 * \pi * 100k\Omega * 1\mu F} = 1,6 \text{ Hz}$$

Wenn die Grenzfrequenz(1,6 Hz) viel kleiner als die Signalfrequenz(50 Hz) ist, arbeitet der Tiefpassfilter als Integrierer(Integrated Signal).

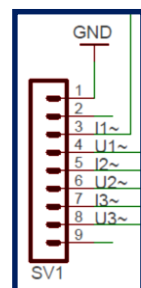
Der Mittelwert wird anschließend mit einem Rail-to-Rail-OP(IC9) MCP601P verstärkt, damit die Auflösung des nachfolgenden ADC in seinem Bereich besser ausgenutzt wird.

$$U_a = U_e \left(1 + \frac{R62}{R63} \right) = U_e \left(1 + \frac{10k}{4,7k\Omega} \right) = U_e * 3,13$$

Der Ausgangswert des Verstärkers ist der gesuchte Wirkfaktor bzw. die Phasenverschiebung, die der Arduino zur weiteren Berechnung der verschiedenen Leistungen benötigt.

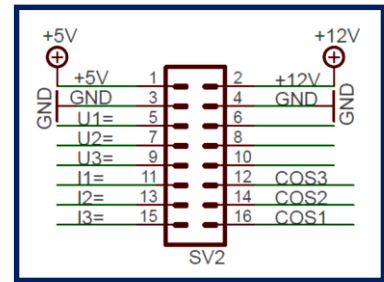
FB15 -> Wechselgrößenverteilung

Über den Stecker1(SV1) werden die Wechselgrößen(U~/I~) von dem UI-Interface zur Weiterverarbeitung auf der Messkarte geleitet.

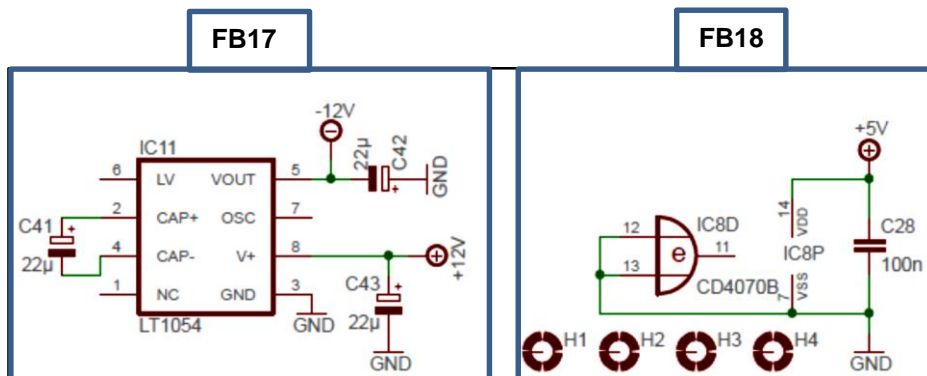


FB16 -> Mikrocontrollerverbindung

Die Messkarte übergibt über den 16-poligen Stecker(SV2) die zuvor erzeugten analogen Werte an den Mikrocontroller. Ebenfalls erhält die Messkarte über diesen Stecker die Versorgungsspannung der ICs.



Zur Spannungsversorgung werden in den Funktionsbereichen folgende Beschaltungen notwendig.



FB17 -> Messgleichrichter Wechselspannungsversorgung

Die Versorgung des Messgleichrichters mit der Wechselspannung von +/- 12 Volt übernimmt der LT1054(IC11). Die Beschaltung kann einem Datenblatt entnommen werden.

FB18 -> EXOR-Gatter Spannungsversorgung

Das EXOR-Gatter(IC8) benötigt eine konstante Gleichspannungsversorgung von 5 Volt, die ebenfalls durch einen Kondensator(C28) entstört wird. Die Beschaltung kann einem Datenblatt der jeweiligen Hersteller entnommen werden.

4.3.14 Arduino-Shield

Das Arduino-Shield wurde als Aufsteckplatine für den Arduino entwickelt. Es soll eine Plattform für die Steckverbindungen(SV) mit zusätzlicher Hardware sein, die eine Verbindung mit dem Arduino herstellt.

Neben der integrierten RTC=Real-Time-Clock(IC1=DS1307) oder abgekürzt „Uhr“ bezeichnet, finden auch der Stecker von der Messkarte(SV9), des SD-Card-Moduls(SV10), des Key-Pads und des LCDs(SV8) Platz. Über SV8, SV9 und SV10 werden alle Komponenten von dem Arduino mit nötigen Gleichspannung versorgt.

Der SV8 hat die Aufgabe die Zeilen(col) und Spalten(row) aus der Key-Pad-Funktion des Arduinos auszuwählen und über die I²C-Schnittstelle die ausgewählten Werte am LCD anzuzeigen. Die Vorteile der I²C-Schnittstelle und seine können unter www.funduino.de nachgelesen werden [24].

Über den SV9 werden analoge Werte von der Messkarte an den ADC des Arduinos übertragen.

Über den SV10 werden Daten über die SPI-Schnittstelle an den Arduino gesendet und empfangen, die zum Beschreiben der SD-Card notwendig sind. Die Technologie hinter der SPI-Schnittstelle kann unter www.arduino.cc nachgelesen werden [25].

Für die Weiterentwicklung ist ein Temperatursensor(IC2) integriert, der aber nicht Bestandteil dieser Arbeit und somit nicht weiter erläutern wird.

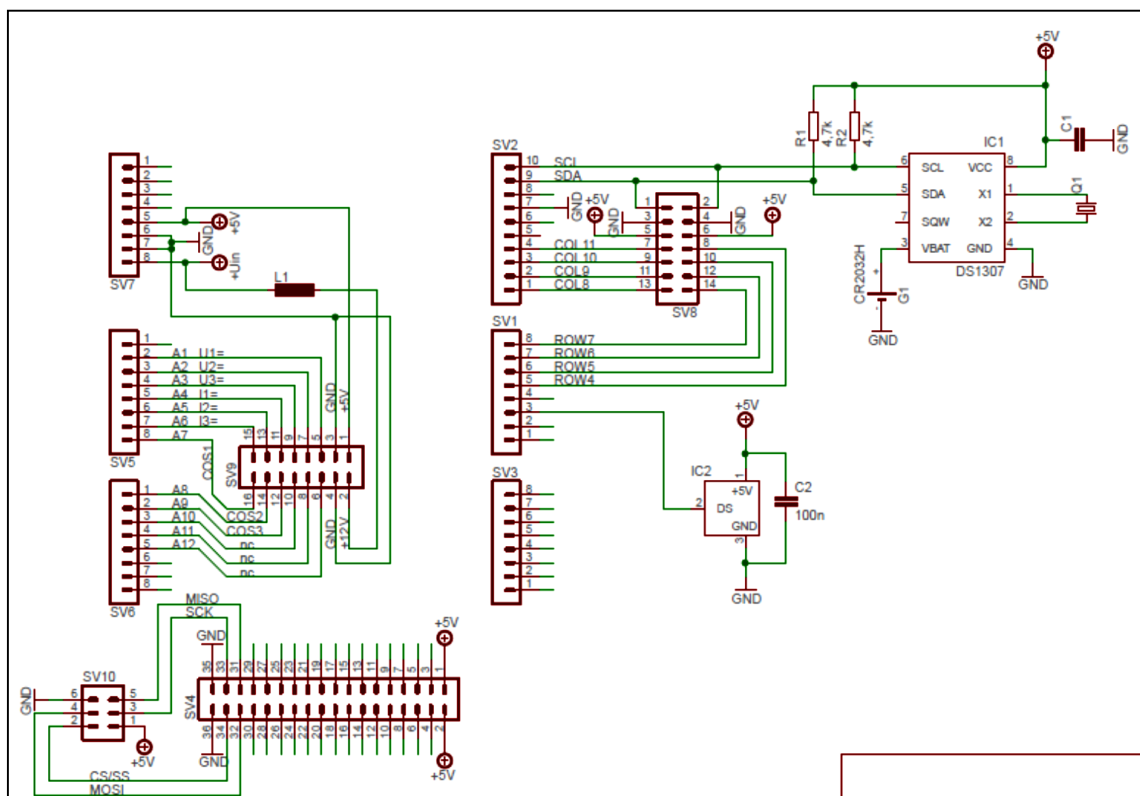


Abbildung 47: Schaltplan Arduino-Shield

4.3.15 Spannungsteiler(SD-card-Modul)

Die SD-Card-Module gibt es in unterschiedlichen Ausführungen. Das gewählte Modul arbeitet mit einer Gleichspannung von 5 Volt. Die SD-Card wird über den Spannungswandler mit 3,3 Volt versorgt.

Die Daten des Arduinos werden mit einem Pegel von 5 Volt an die SD-Card übertragen. Die SD-Card benötigt zum Datenübertragen 3,3 Volt. Daher müssen die Pegel von 5 auf 3,3 Volt mit einem Pegelwandler reduziert werden. Das lässt sich einfach mit einem Spannungsteiler realisieren.

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{R_{N1}}{R_1 + R_{N1}} \rightarrow U_a = U_e * \frac{R_{N1}}{R_1 + R_{N1}} = 5V * \frac{1000\Omega}{560\Omega + 1000\Omega} = 3,21V$$

Dazu werden alle Datenleitungen SC/SS, SCK, MISO und MOSI jeweils durch einen Spannungsteiler beschaltet. Das Übertragen der Daten mit 3,21 Volt reichen für die SD-Card aus.

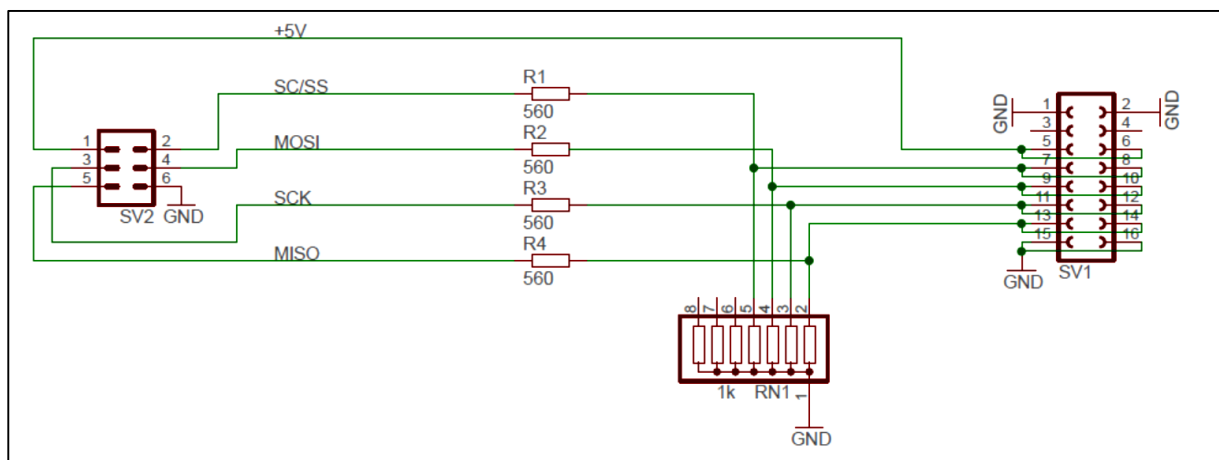


Abbildung 48: Schaltplan Spannungsteiler für SD-Card-Modul

5 Herstellung der Leistungsmesseinrichtung

Dieses Kapitel beschreibt, wie aus einzelnen Komponenten eine mobile Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung hergestellt wird.

Zuerst wird ein Programmcode zum Verarbeiten ankommender Daten geschrieben und auf Plausibilität, mit vordefinierten Signalen aus einem Generator, überprüft. Danach die gekauften und entwickelten Komponenten zu funktionierenden Einheiten zusammengefügt und anschließend zu einem gesamten System zusammengebaut.

Die analogen Signale werden mit dem MC zu gesuchten Ausgabewerten umgewandelt und gespeichert. Die so gewonnenen Daten können zu Analyseziwecken herangezogen werden.

5.1 Programmcode

Der Programmcode durchläuft drei Blöcke, wobei die ersten beiden Blöcke einmalig und der dritte Block in einer Schleife(loop) durchlaufen wird:

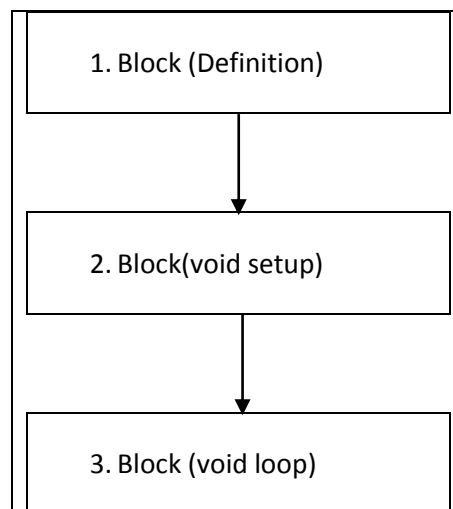


Abbildung 49: Blockbild Programmcode

1. Block:

Im ersten Block werden v.a. globale Variablen bzw. Konstanten definiert, Bibliotheken und Funktionen eingebunden und bei Bedarf Array-Typen erzeugt.

2. Block-> void setup():

Im zweiten Block ist die Funktion bzw. das Unterprogramm **void setup()**. Hier werden durch die Funktionen und Anweisungen die Hardwarekomponenten des Systems initialisiert.

Überprüfungsanweisungen verhindern beispielsweise fehlerhafte Funktionen der Hardware und geben bei Bedarf entsprechende Fehlermeldungen aus.

3. Block-> void loop():

Im dritten Block, durchläuft der Code eine Schleife, weshalb dieser auch **void loop()** genannt wird. Hier werden „lokale“ Variablen deklariert, die nur hier gelten. Das untenstehende Flussdiagramm zeigt die Schleife mit den Blockfunktionen. Jede Blockfunktion beinhaltet eine Unterfunktion mit eigenen Befehlen. Hier können mathematische Funktionen angewendet und unter Beachtung der Logik in beliebige Werte überführt werden.

Das Programmieren wurde mit Hilfe der zahlreichen Arduino Literatur [28] und Foren für Arduino Mikrokontroller gelernt. Der gesamte Programmcode ist im Anhang zu finden.

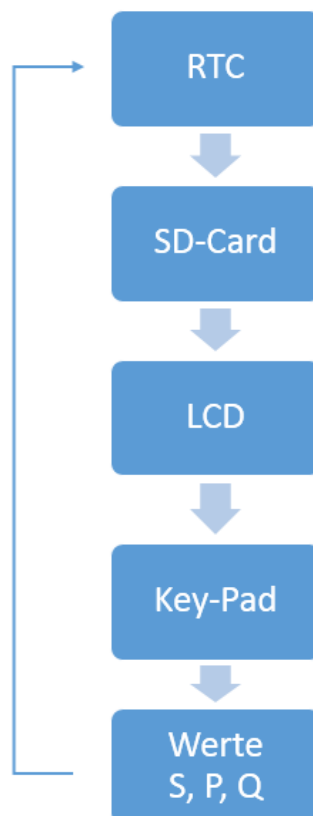


Abbildung 50: Flussdiagramm der void loop()-Schleife mit Blockfunktionen

5.2 UI-Gehäuse

Im UI-Gehäuse werden hohe Netzspannungen in niedrige ungefährliche Spannungen umgewandelt. Im Gehäuse enthaltend sind das UI-Interface und die Anschlusskabel mit Steckern.

Auf der Frontseite sind Anschlüsse für die Stromwandler und Spannungsmesskabel integriert, wobei die grünen LEDs beim korrekten Anschluss aufleuchtenden und gleichzeitig signalisieren, dass die der Spannungsmesskabel richtig angeschlossen sind und Spannung übertragen. Auf der Rückseite befindet sich der Sub-D-Anschluss-Stecker, über den mittels Anschlusskabel die gewandelten analogen Signale überträgt werden.

Die Herstellung des Prototyps erfolgte durch Ausmessen, Anpassen, Bohren usw., wobei eine abgeschlossene Berufsausbildung, die nötigen handwerklichen Fertigkeiten lieferte. Die Bohrungen wurden symmetrisch auf der Fläche angeordnet, sodass ein einheitliches Bild entsteht.

Die unteren Abbildungen zeigen das UI-Gehäuse in geschlossenem Zustand von vorn und im geöffneten Zustand von hinten die Anschlüsse.



Abbildung 51: Frontseite UI-Gehäuse



Abbildung 52: Rückseite UI-Gehäuse

5.2.1 UI-Interface

Das **UI-Interface** wurde auf einer einseitig bedruckten **Leiterplatte** gefertigt. Dazu wurde das zuvor entwickelte Layout mit der EAGLE-Software auf einer Folie ausgedruckt, auf die mit Photolack beschichtete Leiterplatte geklebt und belichtet.

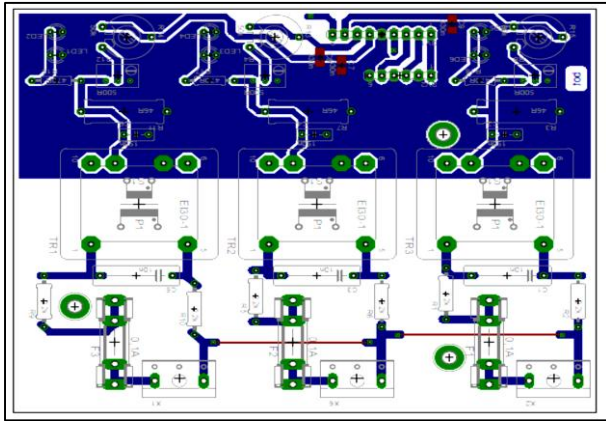


Abbildung 53: Layout UI-Interface

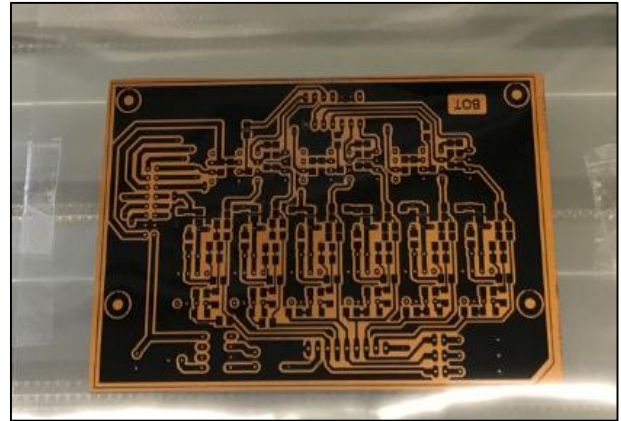


Abbildung 54: Fotoplatine mit Layout-Folie

Anschließend die wiederverwendbare Layout-Folie abgenommen und in ein Entwickler-Bad gelegt. Nachdem die Spuren des Layouts auf der Leiterplatte zum Vorschein gekommen sind, wurde die Platine in ein Ätz-Bad gehängt. In dem Bad werden die belichteten Kupferstellen von der Platine weggeätzt. Ein konservierender Auftrag mit einem speziellen Löt-Lack, verhindert anschließend das oxidieren der blanken Kupferstellen und ermöglicht trotzdem das Lötten der elektronischen Komponenten auf der Platine. Die nachfolgenden Bilder zeigen die Herstellung der selbst angefertigten Komponenten(Platinen), wobei als Beispiel die Messkarte dient.



Abbildung 56: Entwickler-Bad mit Foto-Platine

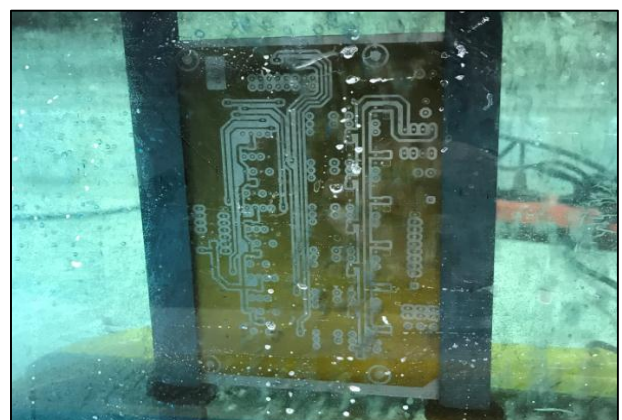


Abbildung 55: Ätz-Bad mit Foto-Platine

Die UI-Interface-Platine wurde mit den Komponenten aus dem Schaltplan mittels Lötzinn und LötKolben verlötet. Der Bestückungsplan zeigt diese Anordnung auf der Platine. Mit dem Vergrößerungsglas wurden alle Lötstellen und Kupferbahnen nachkontrolliert. Kalte Lötstellen bilden keinen Kontakt zwischen Lötzinn und Kupferbahn. Lötüberbrückungen können einen Kurzschluss verursachen.

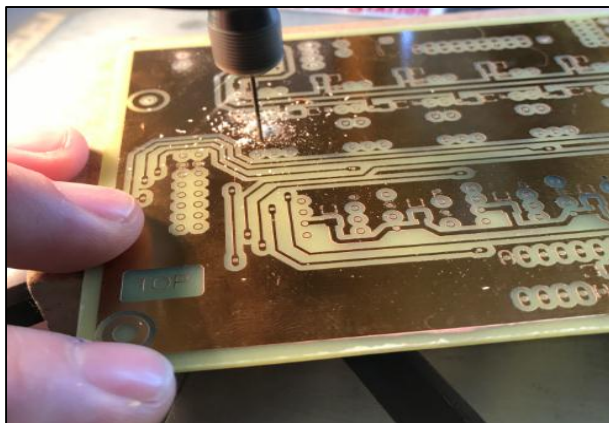


Abbildung 58: Vorbereitung zum Löten

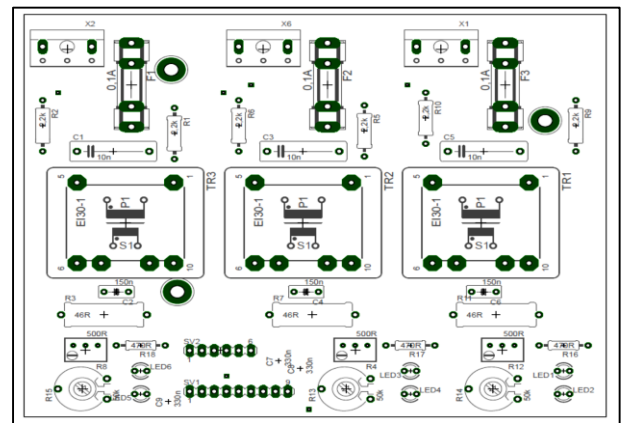


Abbildung 57: Bestückungsplan UI-Interface

Alle freien spannungsführenden Anschlusskabel wurden abisoliert und zusätzlich ein Schrumpfschlauch als Berührungsschutz verwendet.

Auf der Platine beträgt der Abstand zu spannungsführenden Anschlüssen 10 mm!!!

Die Platine wurde auf der UI-Box angeschraubt. Die UI-Box muss Lüftungsschlitze haben, damit der Lastwiderstand seine Wärme abführen kann. Lose Kabel werden mit Kabelbindern zusammengehalten, damit diese nicht in der Box wackeln und abreißen können.

Auf der Rückseite wurde mit der Feile eine Öffnung für den Sub-D-Stecker vorbereitet und angepasst. Anschließend der Stecker angeschraubt.

5.3 Mess-Gehäuse

Im Mess-Gehäuse ist das Herzstück der Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung untergebracht. Hier werden alle Signale zusammengeführt, verarbeitet und am LCD ausgegeben.

Die Herstellung des Gehäuses und das Einpassen der Komponenten erfolgten wie bei dem UI-Gehäuse.



Abbildung 59: Mess-Gehäuse Draufsicht



Abbildung 60: Mess-Gehäuse Ansicht von rechts

Das Mess-Gehäuse enthält sowohl gekaufte als auch selbst hergestellte Komponenten. Dazu gehören die Aluminium-Grundplatte, das SD-Card-Modul mit dem Spannungsteiler, die SD-Card, ein Akku, ein Key-Pad, der Arduino Mega mit dem Arduino-Shield, das LCD mit dem I²C-Modul, An-, Aus-Knopf mit Sicherung und eine Netzanschlussbuchse für die externe Netzversorgung.

5.3.1 Messkarte

Die Herstellung der Messkarte benötigte viel Zeit. Die Montage der vielen verwendeten elektronischen Bauteile auf der Platine brauchten viel Fingerspitzengefühl und Geduld. Wegen Platzgründen wurden sowohl DIL-, als auch SMD-Teile angelötet. Der Ablauf der Herstellung war wie auch bei dem UI-Gehäuse, weshalb die einzelnen Herstellschritte nicht wiederholt werden. Aus Platzmangel wurde die Platine, im Gegensatz zum UI-Interface, beidseitig verwendet. Dazu wurde sowohl die Oberseite(Top), als auch die Unterseite(Bottom) der Platine belichtet, entwickelt und geätzt. Dementsprechend ist die Herstellung des Layouts aufwendiger. Auf der unteren Abbildung sind auf dem Layout die blauen Bahnen der Oberseite und die roten Bahnen der Unterseite der Messkarten-Platine zu sehen.

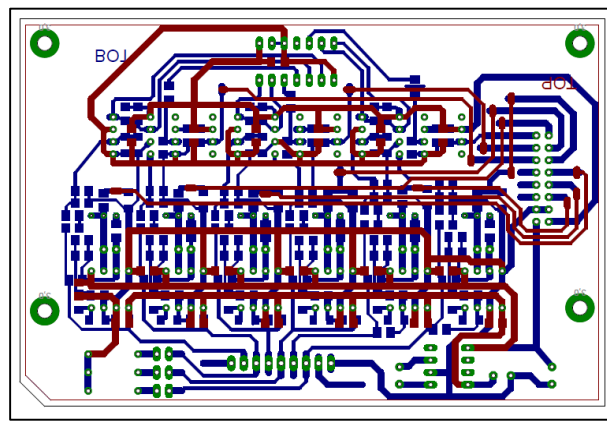


Abbildung 61: Layout Messkarte mit Ober- und Unterseite

Um einen Eindruck zu geben wie viele Teile gelötet wurden, sind unten links der Bestückungsplan und rechts die fertiggelötete Oberseite der Platine zu sehen.

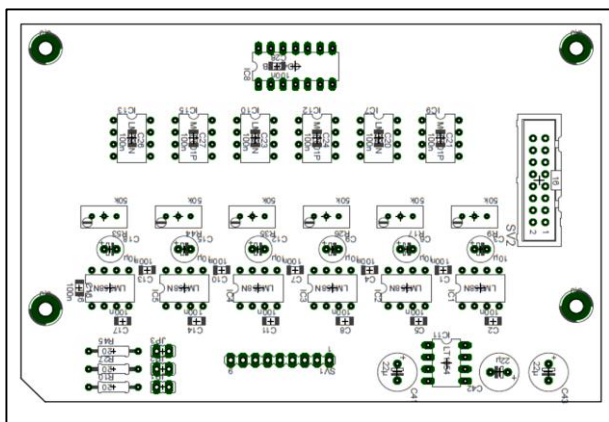


Abbildung 63: Bestückungsplan Messkarte Oberseite

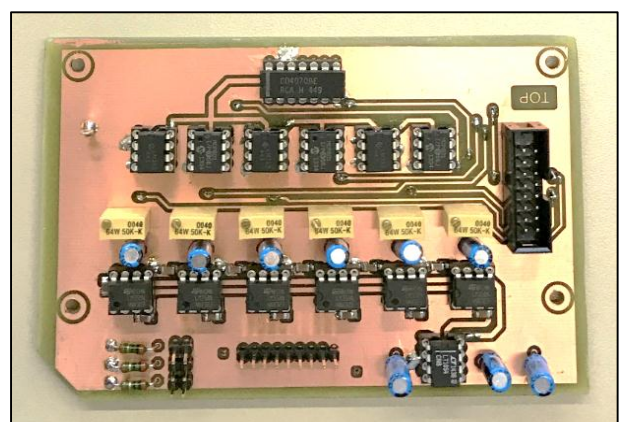


Abbildung 62: Fertiggelötete Messkarte der Oberseite

Unten auf den Abbildungen ebenfalls zu sehen ist links der Bestückungsplan und rechts die fertige Unterseite der Messkarte zu sehen.

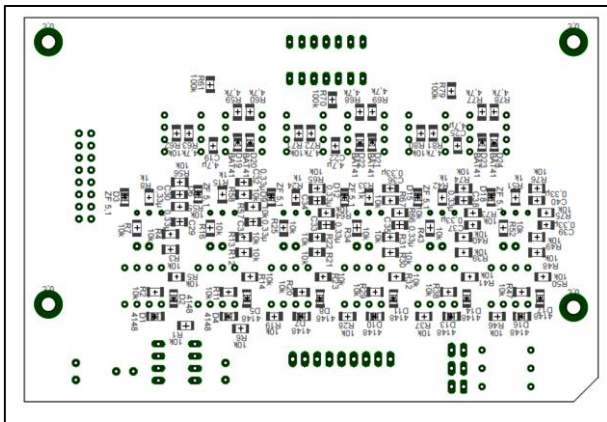


Abbildung 65: Bestückungsplan Messkarte Unterseite

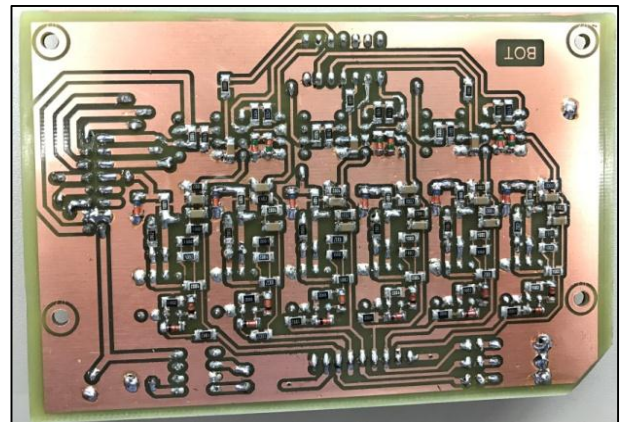


Abbildung 64: Fertigelötete Messkarte der Unterseite

Die fertige Messkarte wurde in dem Mess-Gehäuse auf der Grundplatte verschraubt. Die Bauteile wurden mit einem dünnen Filzstift beschriftet. Ein passendes farbiges Flachbandkabel wurde mit einer neun-poligen Stiftleiste verlötet und an den neun-poligen Sub-D-Stecker verlötet. Der Stecker wurde anschließend an dem Mess-Gehäuse angeschraubt.

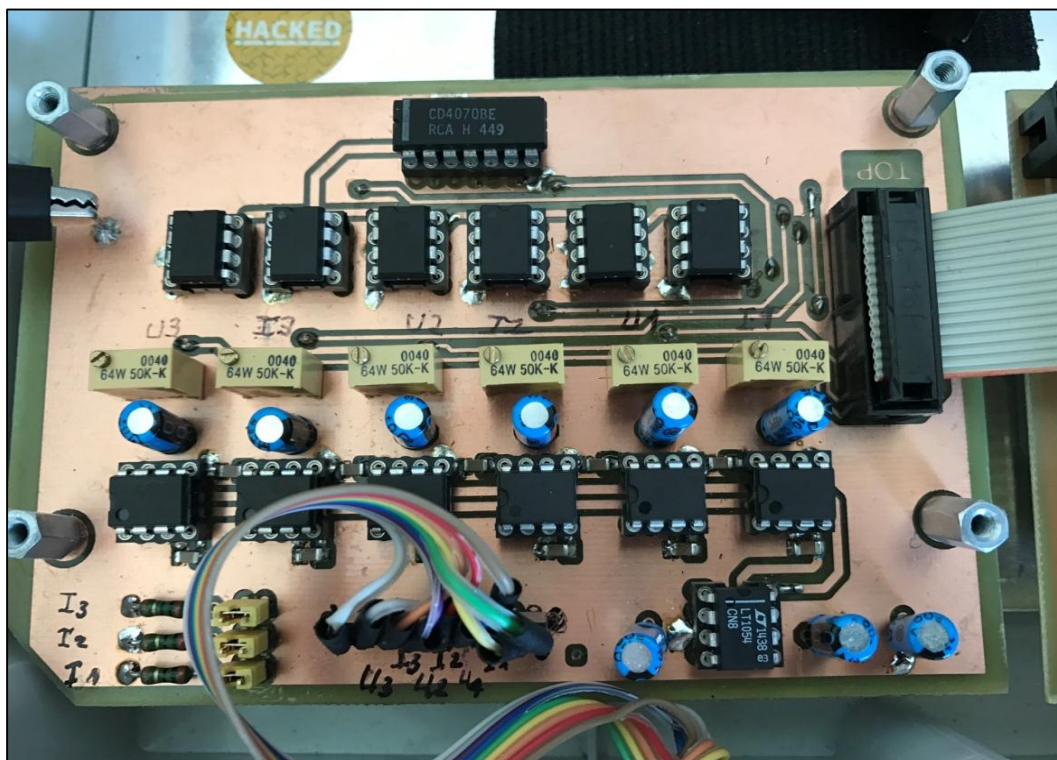


Abbildung 66: Messkarte im Mess-Gehäuse

5.3.2 Arduino-Shield

Das Arduino-Shield ist eine Steckplatine für den Arduino. Die Herstellung erfolgte wie zuvor bei dem UI-Interface und der Messkarte. Das Shield wird auf den Arduino gesteckt. Das Layout wurde den Abmessungen des Arduinos angepasst, sodass die Abstände der Steckstifte übereinstimmen und die verbauten Hardwareteile unter dem Shield ausreichend platzfinden. Auf der Platine wurde die RTC(Uhr) mit den dazugehörigen Komponenten verbaut, wobei die Anordnung frei gewählt wurde. Die Uhr würde bei Stromunterbrechung mit die 3-Volt-Batterie weiter versorgt.

Unten links sind gut die Anschlüsse an den Arduino auf dem Layout zu sehen, die von der Messkarte(SV9), dem SD-Card-Modul(SV10) und dem Key-Pad mit LCD(SV8) kommen. Unten rechts zeigt der Bestückungsplan die Anordnung auf der Platine

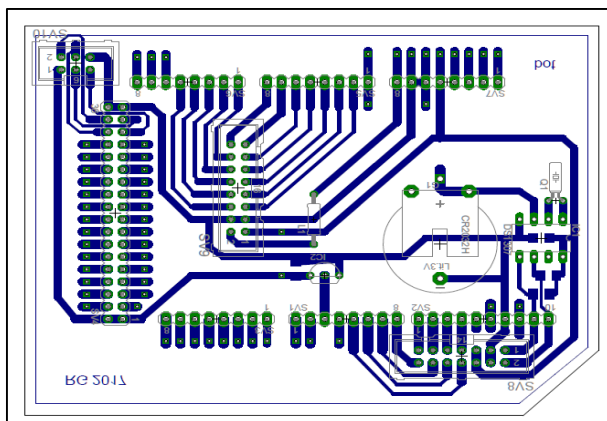


Abbildung 68: Layout Arduino-Shield

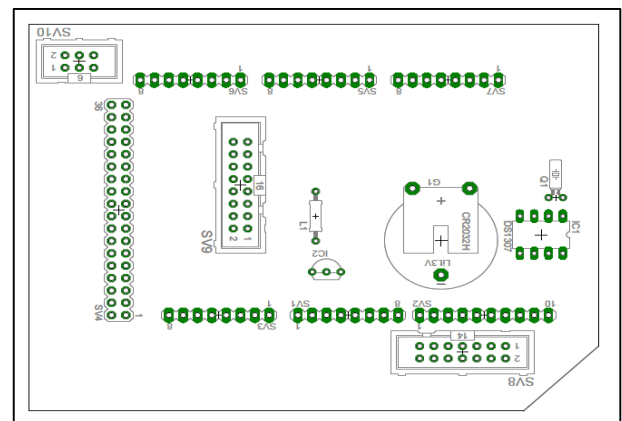


Abbildung 67: Bestückungsplan Arduino-Shield

Unten im Bild ist das fertige Arduino-Shield zu sehen, welches bereits auf dem Arduino aufgesteckt wurde.

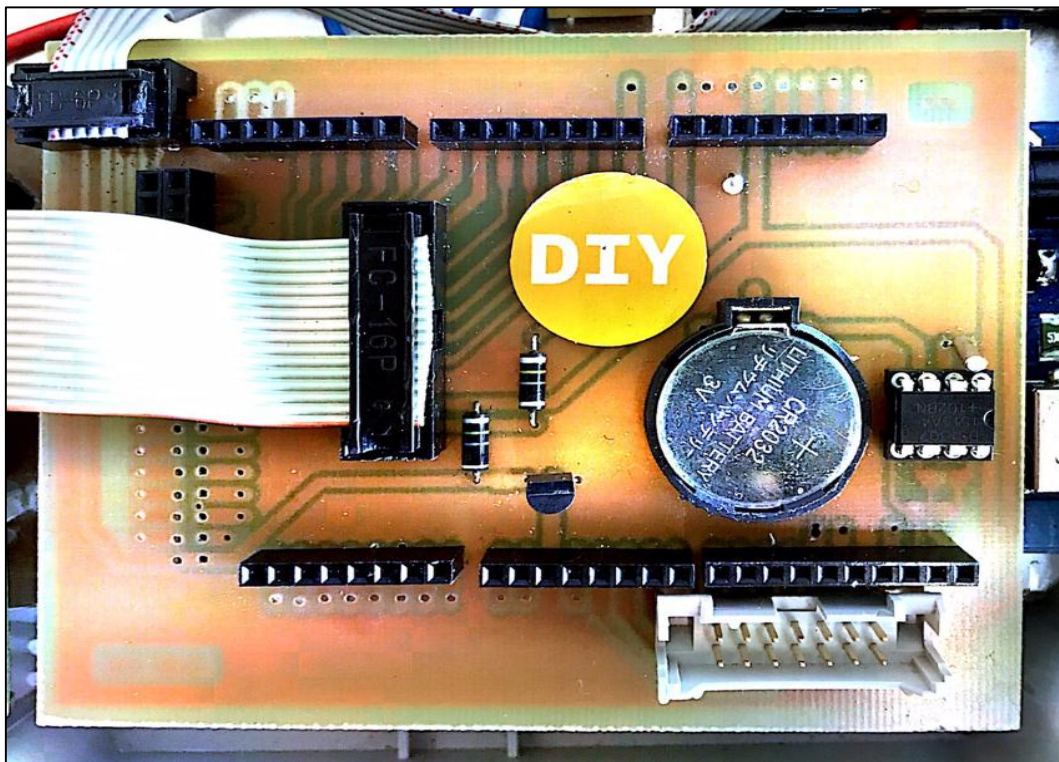


Abbildung 69: Arduino-Shield nach Fertigstellung

5.3.3 LCD mit I²C-Modul

Das LCD besitzt ein zusätzliches I²C-Modul, welches auf die Rückseite des Displays gelötet wurde. Dieses Modul ermöglicht es mit nur 4 Anschlüssen mit dem Arduino Daten zu empfangen und anzuzeigen. Der Arduino braucht dafür ein Zusatzprogramm bzw. eine Bibliothek, die im Programmcode integriert wurde. Fertig montiert sieht dieser Aufbau auf der LCD-Rückseite wie folgt aus.



Abbildung 70: Oben links die 4 Anschlüsse und oben rechts das I²C-Modul

5.3.4 SD-Card-Modul mit Spannungsteiler

Auf dem SD-Card-Modul sitzt ein Spannungsteiler, der die Datenleitungen mit den nötigen 3,3 Volt versorgt. Es wurde auf der Aluminium Grundplatte angeschraubt.

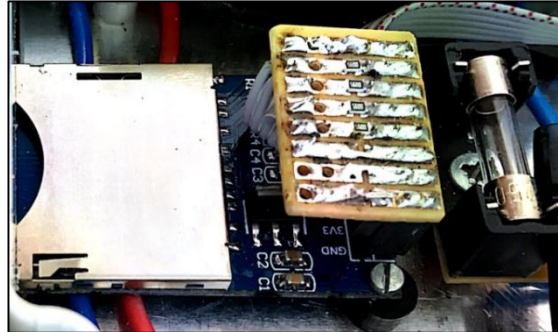


Abbildung 71: SD-Card-Modul mit Spannungsteiler

5.3.5 Sub-D-Stecker

Den Sub-D-Stecker oder D-Sub gibt es in zwei Varianten, der weiblichen(Female) und der männlichen(Male) Variante. Der männliche 9-polige-Sub-D-Stecker, auch D-Sub DE-9(männlich) bezeichnet, wird für verschiedene Zwecke eingesetzt. Es gibt diesen in unterschiedlichen Bauformen. International genormt ist dieses Stecksystem unter **IEC 807-2** und in Deutschland in der **DIN 41652-1** [29].



Abbildung 72: Sub-D-Stecker männlich, links Vorderansicht, mittig Lötansicht von hinten, rechts Belegungsplan [29]



Abbildung 73: Sub-D-Stecker weiblich, links Vorderansicht, mittig Draufansicht, rechts Belegungsplan [29]

Zum Datenübertragen wird zwischen dem UI- und der Mess-Gehäuse ein abgeschirmtes Datenkabel von 1 Meter Länge verwendet. (Typbezeichnung: **ELITRONIK-CY** 10x0,14mm² ZL60184). Dieses Kabel wurde mit dem weiblichen Sub-D-Stecker verlötet und anschließend in dem schwarzen Schraubgehäuse fixiert. Auf der unteren Abbildungen zu sehen ist das fertige Datenkabel mit männlichen Sub-D-Steckern auf beiden Seiten, welches die Messwerte aus dem UI-Interface an die Messkarte überträgt.



Abbildung 74: Datenkabel mit Sub-D-Steckern

Der Anschluss mit dem UI-Interface bzw. mit der Messkarte und dem männlichen Sub-D-Stecker erfolgte mit einem bunten Flachbandkabel. Das 9-polige Kabel wurde mit den Sub-D-Steckern und den Stiftleisten verlötet.

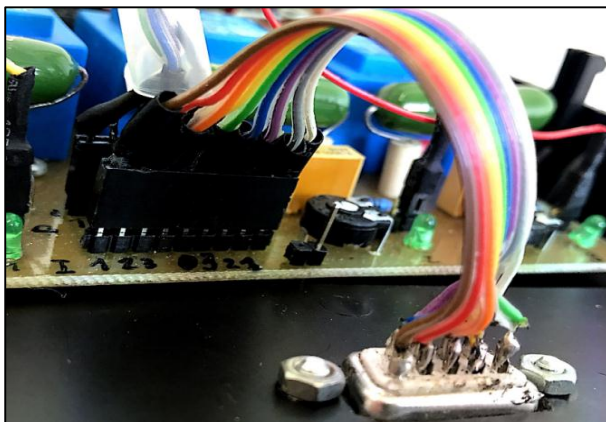


Abbildung 76: Verbindung Sub-D-Stecker mit der Platine im UI-Gehäuse



Abbildung 75: Verbindung Sub-D-Stecker mit der Platine im Mess-Gehäuse

5.3.6 Herstellung der Stecker

Spezielle Stecker werden mit einer Drücktechnik auf die Flachbandkabel gedrückt. Das erspart das Verlöten und somit viel Zeit.

Auf den unteren Abbildungen ist so ein Stecker mit Flachbandkabel zu sehen, der zum Übertragen von Daten und sehr kleinen Strömen gedacht ist.



Abbildung 77: Klemmstecker vor, beim und nach der Verarbeitung

6 Bedienung Leistungsmesseinrichtung

Die in Kapitel 5 hergestellte Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung wird nun in diesem Kapitel zum Einsatz gebracht. Dazu musste die Einrichtung zuvor noch kalibriert und dem Programmcode angepasst werden.

6.1 Kalibrierung Leistungsmesseinrichtung

Die Kalibrierung bzw. die Werkseinstellung der Leistungsmesseinrichtung fand in drei Schritten statt

6.1.1 Kalibrierung

1. Schritt -> Sekundärspannung einstellen(FB4)
2. Schritt -> Phasenverschiebung einstellen(FB5)
3. Schritt-> Messgleichrichter einstellen(FB8/FB9)

Die sinusförmigen Sekundärspannungen wurden auf 1 Volt mit dem verstellbaren Widerstand(R12), wie auf der unteren Abbildung zu sehen, eingestellt und mit einem Oszilloskop kontrolliert.



Abbildung 78: Sekundärspannung einstellen auf dem UI-Interface

Die Phasenverschiebung wurde wie in FB14 beschrieben auf den Wert Null eingestellt und ebenfalls nachkontrolliert. Die Phasenverschiebung verhält sich nicht linear und musste bei der Werteübergabe an den Arduino im Programmcode berücksichtigt werden.

Die Wechselgrößen von Strom und Spannung werden mit dem Messgleichrichter für den Arduino gleichgerichtet(FB8/FB9). Die 230 Volt Wechselspannung entsprechen 2,3 Volt Gleichspannung. Der Wechselstrom zwischen 0 und 100 Ampere wird im Bereich von 0 bis 5 Volt gleichgerichtet. Die gleichgerichteten Werte werden an den Arduino übergeben.

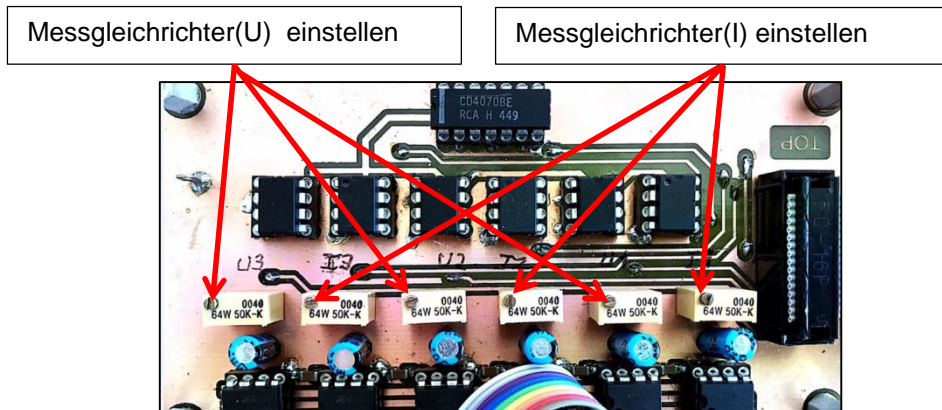


Abbildung 79: Phasenverschiebung und Messgleichrichter einstellen auf der Messkarte

6.1.2 Signallaufplan

Der Arduino verarbeitet ausschließlich mit Gleichspannung von 0 bis 5 Volt. Dabei wandelt der ADC die analogen Eingangswerte in digitale Werte um und teilt diese in 1024 Schritte auf. Damit der Programmcode angepasst werden kann, wurden die Werte von der Messkarte gemessen und auf einem Signalverlaufsplan festgehalten.

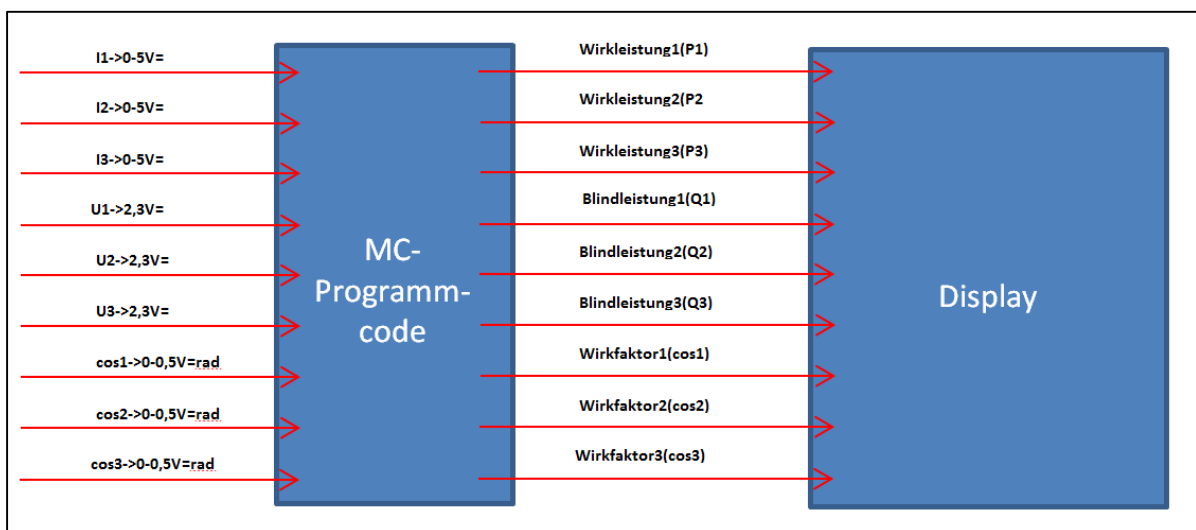


Abbildung 80: Signalverlaufsplan

6.1.3 Programmcodeanpassung

Der Code wurde zuvor so programmiert, dass dieser nur noch an die Werte aus dem Signallaufplan angepasst werden musste.

In der void loop()-Schleife wurden mit dem Map-Befehl die Daten dementsprechend angepasst. Der Map-Befehl hat die Besonderheit, einen bestimmten Bereich einzugrenzen und in einen gewünschten Bereich umzuwandeln.

Im „case A“ wurden die gemessenen Stromwerte behandelt. Dabei entsprechen maximal 5 Volt den maximal messbaren 100 Ampere aus dem Stromwandler. Die 5 Volt werden in 1024 Schritte geteilt und in einem Ausgabebereich von 0 bis 100 Ampere mit dem Map-Befehl umgewandelt. Hier wurde der Programmcode wie folgt angepasst.

```
Strom1=map(I1, 0, 1023, 0, 100);
```

Im „case B“ wurde die gemessene Spannung angepasst. Die Spannung auf dem Arduino sollte auf 2,3 Volt= umgestellt werden.

Rechnung: $X=2,3V \cdot 1024/5V=470$. D.h. bei 470 beträgt die Wechselspannung 230 Volt.

```
Spannung1=map(U1, 0, 1023, 0, 470);
```

Die Phasenverschiebung wurde im „case C“ verarbeitet. Dabei wurden die analogen Werte aus dem FB14 eingelesen. Wie bereits erwähnt, trat hierbei eine Besonderheit auf. Der eingelesene Wert sollte ins Bogenmaß(rad) überführt werden.

Rechnung: Eine Umdrehung beträgt 360 Grad($2 \cdot \text{Pi}$) und entspricht im Bogenmaß dem Winkel von $6,28(2 \cdot 3,14)$. Der Wirkfaktor liegt im ersten Quadranten zwischen 0 und $1,57(=6,28/4)$. Der Wirkfaktor $\cos(\text{phi})$ hat bei keiner Phasenverschiebung den Wert 1 und bei 90 Grad($1,57$) den Wert 0.

```
Wirkfaktor1=cos(map(cos1, 0, 1023, 0, 1.57));
```

Mit den ermittelten und verarbeiteten Werten, konnten anschließend alle gesuchten Leistungsarten berechnet und ausgegeben werden. Die Funktionen entsprechen einer mathematischen Formel, die der Arduino versteht.

Im „case D“ sieht die Funktion für die Wirkleistung1(P1) wie folgt aus.

$$\mathbf{Wirkleistung1=Strom1*Spannung1*Wirkfaktor1;}$$

Im „case 1“ sieht die Rechnung für die Scheinleistung1(S1) einfach aus.

$$\mathbf{Scheinleistung1=U1*I1;}$$

Das „case 2“ wurde für die Blindleistung1(Q1) eine andere Funktion benötigt, die auch für globale Variable einen long benötigte, um die Variable verarbeiten zu können.

$$\mathbf{Blindleistung1=sqrt(sq(S1)-sq(P1));}$$

Der gesamte Programmcode ist dem Anhang zu entnehmen.

6.2 Bedienungsanleitung

Nachdem der Programmcode auf dem Arduino angepasst wurde, konnte die eigentliche Messung mit dem Drehstrom-Leistungsmessgerät stattfinden. Dafür sollten alle Anschlüsse kontrolliert bzw. verbunden und das dazugehörige Zubehör angeschlossen werden.

6.2.1 Anschluss der Leistungsmesseinrichtung

Zuallererst sollte sichergestellt werden, dass alle Anschlüsse im UI-Gehäuse und dem Mess-Gehäuse richtig sitzen. Der Akku sollte mit dem Arduino und dem speziellen Anschlusskabel verbunden worden sein, damit die Einrichtung bei Stromausfall weiterhin arbeiten und Daten aufzeichnen kann. Die SD-Card sollte ebenfalls vor Inbetriebnahme in dem SD-Card-Modul stecken.

In der unteren Abbildung zu sehen ist das offene UI-Gehäuse mit den Spannungswandlern und sonstigen elektrischen Bauelemente.



Abbildung 81: UI-Gehäuse offen, Anschlüsse im Inneren

Auf der nachfolgenden Abbildung ist das geöffnete Mess-Gehäuse zu sehen. Oben in der Abbildung ist der Gehäuseboden mit dem Akku, der Messkarte, dem, Arduino-Shield und unten der Gehäusedeckel mit dem LCD bzw. Anschlusskabel und Stecker.

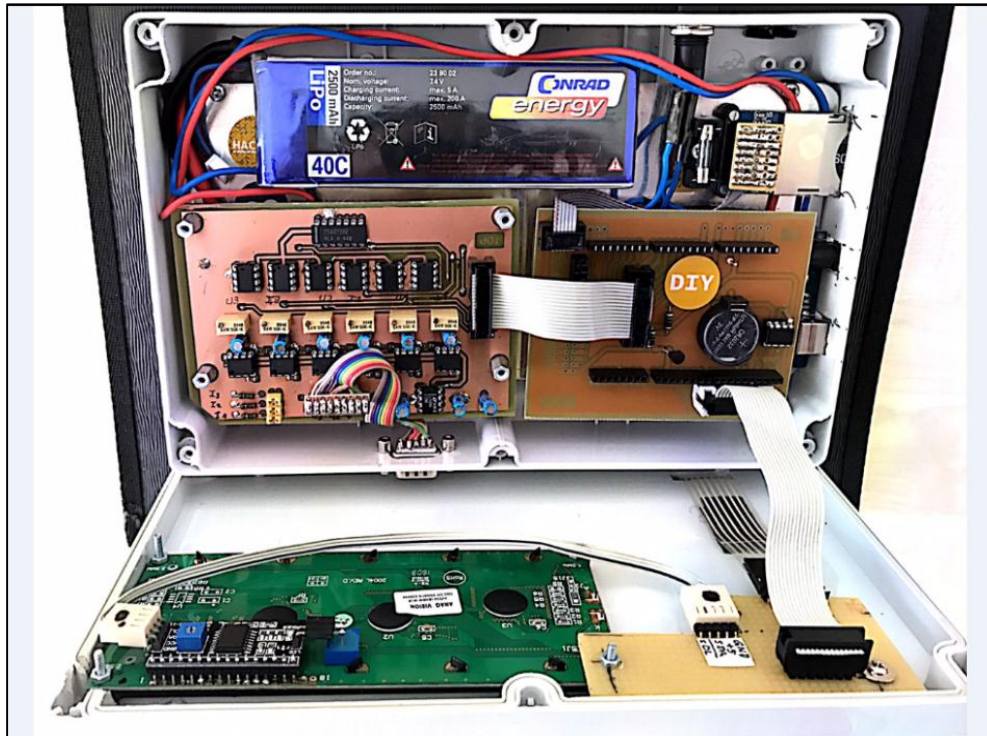


Abbildung 82: Mess-Gehäuse offen, Anschlüsse im Inneren

6.2.2 Gesamte Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung

Die gesamte mobile Drehstrommesseinrichtung besteht aus folgendem Umfang:

- 4x Spannungsmesskabel
- 4x Spannungsmesszangen (Fluke)
- 3x Stromwandler teilbar (100A/50mA)
- 1x LiPo-Akku
- 1x UI-Gehäuse
- 1x Mess-Gehäuse
- 1x SD-Card (16GB)
- 1x Netzanschluss (12V)
- 1x Datenlabel (UI-Mess)
- 1x Alu-Koffer

Zu sehen ist die Leistungsmesseinrichtung mit dem erforderlichen Zubehör. Im aufgebauten Zustand sieht sie wie folgt aus.

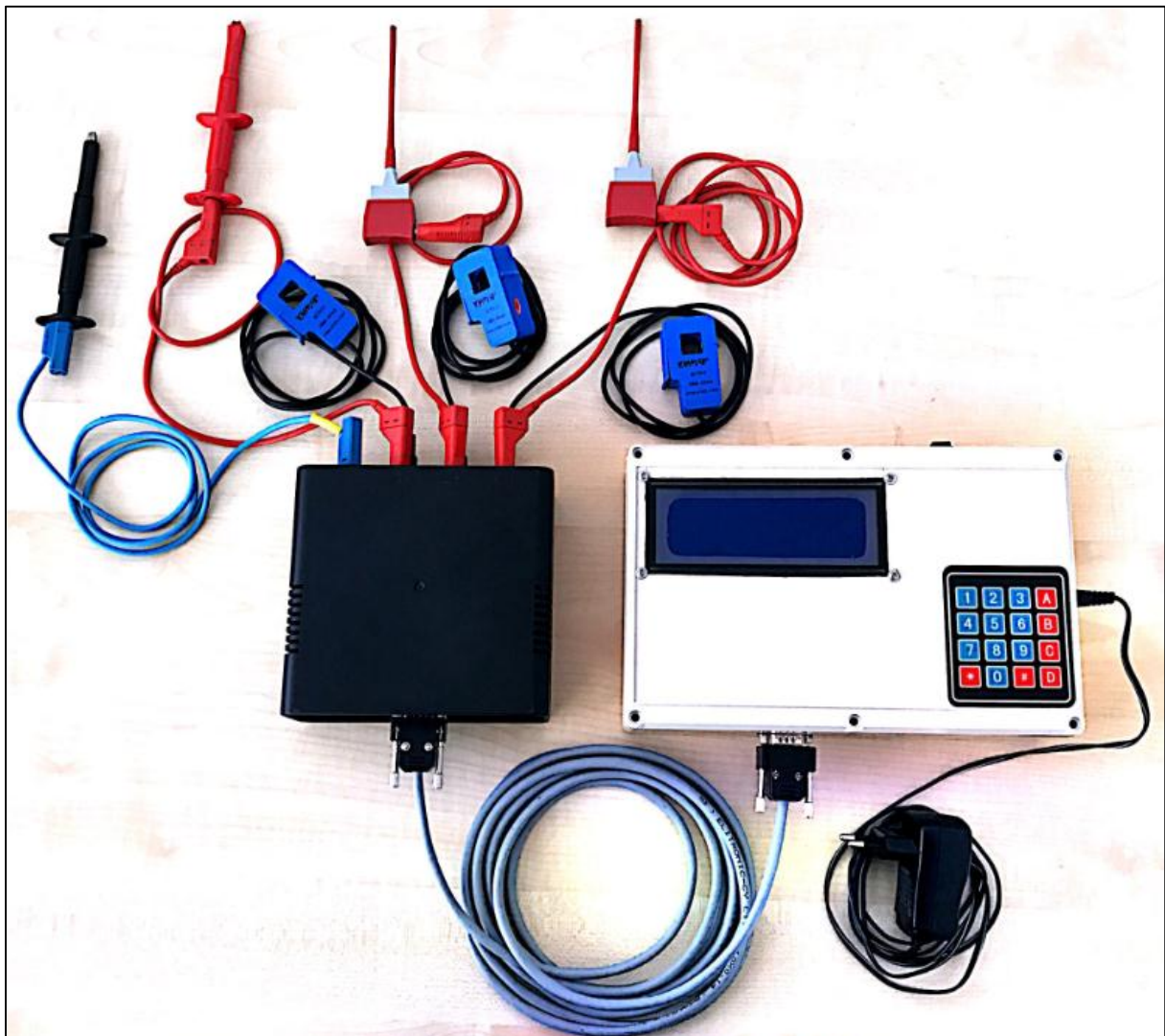


Abbildung 83: mobile Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung

6.2.3 Inbetriebnahme der Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung

Alle Gehäuse werden gut verschlossen bzw. zusammengeschraubt. Es ist darauf zu achten, dass keine losen Enden herausstecken.

Die 4 Spannungsmesszangen werden mit den Spannungsmesskabeln verbunden und in das UI-Gehäuse gesteckt. Die Stromwandler steckt man in die dafür vorgesehenen Stellen neben der Spannungsmesskabel.



Abbildung 84: UI-Gehäuse mit Spannungskabel(rot/blau) und Stromwandler(schwarz)

Das UI-Gehäuse wird mit dem Datenkabel an das Mess-Gehäuse verbunden. Der Netzanschluss kommt in eine 230 Volt Steckdose. Die SD-Card muss im Mess-Gehäuse vorhanden sein.

Die Stromwandler und die Spannungsmesszangen werden an zugänglichen Stellen bzw. Leitern so angeschlossen, dass ein dauerhaftes und gefahrloses Messen stattfinden kann. Das untenstehende Bild zeigt schematisch den Anschluss der Messeinrichtung an das Drehstrom-Leiternetz.

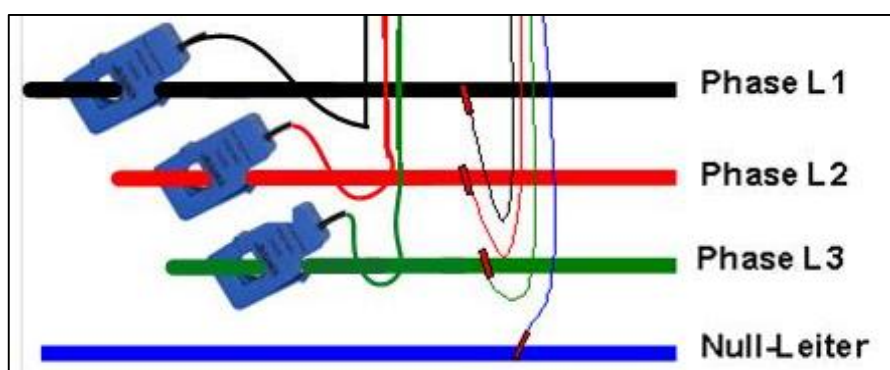


Abbildung 85: Schematischer Anschluss der Stromwandler und Spannungskabel am Drehstrom-Leiternetz

Sind die Spannungskabel an dem jeweiligen Leiter korrekt angeschlossen, leuchtet die jeweilige LED grün auf. Es ist zu achten, dass der Pfeil auf dem Stromwandler in technische Stromrichtung zeigt, da ansonsten die Einrichtung falsche Werte anzeigen würde.

In der unteren Abbildung zu sehen ist ein Messanschluss mit den drei Stromwandlern und den Spannungsmesskabeln an einem Schütz.



Abbildung 86: Beispiel Messanschluss

Nach dem Einschalten, durchläuft das System einen Überprüfungscheck. In der unteren Abbildung zeigt das LCD ein Auswahlmenü mit Werten an, die über das Key-Pad ausgewählt werden können. Bei drücken der jeweiligen Taste wird der gewünschte Wert angezeigt. Mit der Taste D kehrt man wieder in das Auswahlmenü zurück.

Taste A: Stromstärke I1, I2, I3

Taste B: Spannung U1, U2, U3

Taste C: Phasenverschiebung $\cos(\phi)$

Taste D: Wirkleistung P1, P2, P3

Taste 1: Scheinleistung S1, S2, S3

Taste 2: Blindleistung Q1, Q2, Q3



Abbildung 87: Auswahlmenü

6.3 Aufbewahrung der Leistungsmesseinrichtung

Die Aufbewahrung und der Transport der mobilen Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung können in einem Standard Alu-Koffer aus dem Baumarkt stattfinden.



Abbildung 88: Anordnung Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung im Alu-Koffer



Abbildung 89: Transport Alu-Koffer

7 Validierung

Die Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung wird in diesem Kapitel auf ihre korrekte Funktionalität und Ausgabewerte überprüft bzw. validiert.

Nachdem die Messeinrichtung hergestellt, angepasst und kalibriert wurde, sollte diese mit einer zertifizierten Leistungsmesseinrichtung überprüft werden. Dazu wurde eine Laboreinrichtung der HAW Hamburg des Departements Maschinenbau und Produktion, sowie ein Leistungsanalysator HM8115-2 der Firma Rohde und Schwarz zur Verfügung gestellt. Dieser Leistungsanalysator HM8115-2 wurde in dem Kapitel Stand der Technik bereits vorgestellt.

Auf der unteren Abbildung ist der Messaufbau mit den beiden Leistungsmesseinrichtungen zu sehen. Es wurden auch andere Messeinrichtungen verwendet, die lediglich zur Kontrolle der Messwerte dienen.

Die Wechselspannung betrug 230 Volt, die geregelt werden konnte. Die Stromaufnahme der Verbraucher wurde bis auf 10 Ampere begrenzt. Um eine höhere Stromstärke zu simulieren, wurde die stromführende Leitung 6 Mal durch den Stromwandler geführt. Bei 10 Ampere Stromaufnahme am Verbraucher, würde dies einem Wert von 60 Ampere auf der Leistungsmesseinrichtung entsprechen.

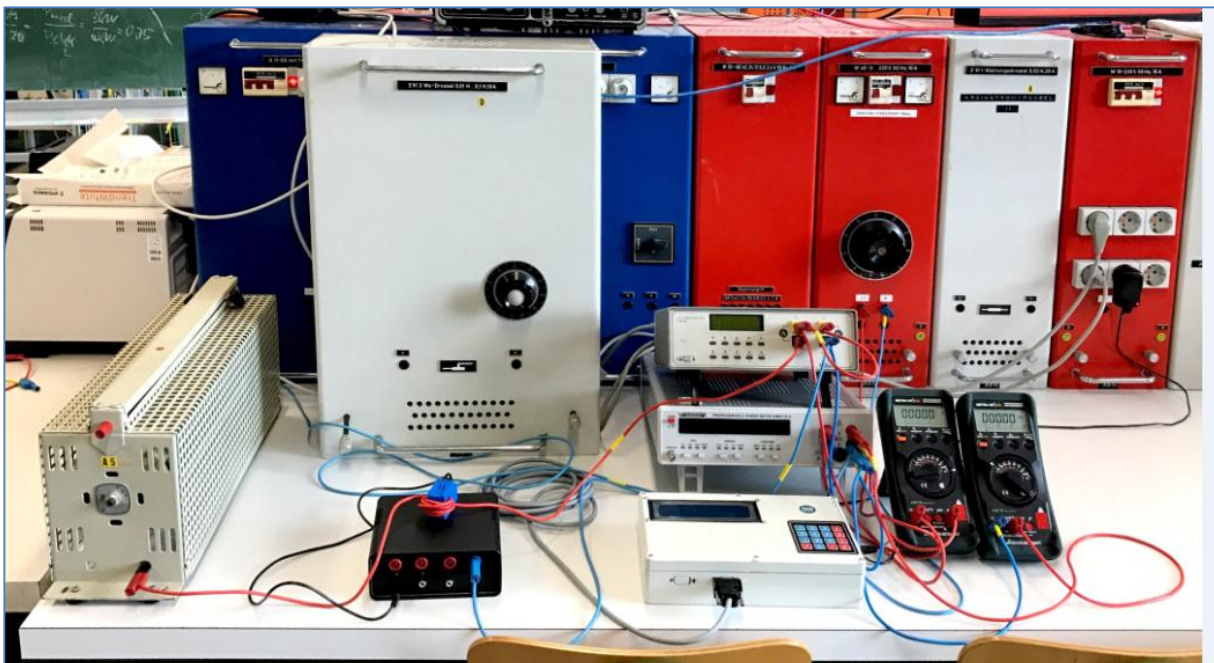


Abbildung 90: Messaufbau zur Validierung der Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung

Zuerst wurde die Wechselspannung(U) in der Laboreinrichtung auf 230 Volt eingestellt. Dieser Bereich schwankte mit ca. +/-2 Volt.

Oben links in der Abbildung befindet sich der HM8115-2. Seine Spannung betrug 229 Volt und die der Leistungsmess-einrichtung lag bei 229 und 230 Volt. Die Spannungswerte stimmten nahezu überein.



Abbildung 91:
Wechselspannung von 229 V

In nachfolgenden Abbildungen wurde die Phasenverschiebung bzw. der Wirkfaktor(cosphi) untersucht. Die Phasenverschiebung im Bereich von 1 bis 0,30 weichte um 3 Prozent ab.



Abbildung 92:
Phasenverschiebung von 1.00

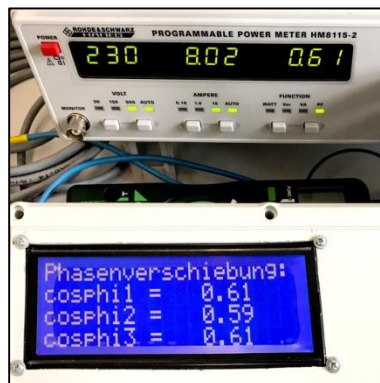


Abbildung 93:
Phasenverschiebung von 0.61



Abbildung 94:
Phasenverschiebung von 0.31

Anschließend wurde die Stromstärke(I) überprüft. Der Stromwandler wurde 6-fach gewickelt, weshalb der Wert 7,99 Ampere des HM8115-2 mit dem Faktor 6 zu multiplizieren war. Die Stromstärke($I=7,99A*6 \approx 48A$) der Leistungsmess-einrichtung betrug 48 Ampere. Die Stromstärke passte ebenfalls überein.



Abbildung 95: Stromstärke von 48 A

Anschließend wurde die Wirkleistung kontrolliert. Dafür musste der Wert des HM8115-2 mit dem Faktor 6 multipliziert werden. Die Wirkleistung von 482 Watt des HM8115-2 multipliziert mit dem Faktor 6 ergibt 2892 Watt. Die Wirkleistung der Leistungsmesseinrichtung betrug 3179 Watt.

Dies entspricht einer Abweichung von 9 Prozent. Das bedeutete, dass die Leistungsmesseinrichtung kalibriert und/oder der Programmcode angepasst werden musste.

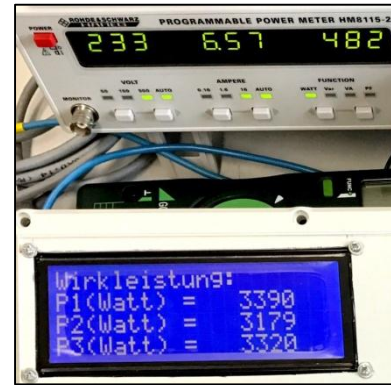


Abbildung 96: Wirkleistung von 3,18 kW

Die Werte für die Schein- sowie Blindleistung wurden hier nicht weiter aufgeführt.

Die Leistungsmesseinrichtung wurde anschließend nachkalibriert. Nach der Kalibrierung wurden die Wirk-, Schein- und die Blindleistung kontrolliert. Die Messwerte weichten um ca. 2 Prozent ab, was ein gutes Messergebnis bedeutete.

8 Kostenanalyse

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Kostenaufstellung der mobilen Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung.

Für die Entwicklung und die Herstellung der Messeinrichtung wurde viel Zeit in Anspruch genommen. Um die Gesamtkosten der Einrichtung beziffern zu können, musste der gesamte Zeitraum berücksichtigt werden.

Die Gesamtkosten teilen sich in zwei Kategorien auf. Die erste Kategorie beschäftigt sich mit den zugekauften Komponenten, dessen Kosten direkt zugeordnet werden können (Stückkosten). Die zweite Kategorie ermittelt die Entwicklungs- und Herstellungskosten anhand des benötigten Zeitaufwands (Arbeitskosten). Die Stückkosten sowie die Arbeitskosten variieren sehr stark, je nachdem wo man die Teile zukauf und produzieren lässt. Für die Arbeitskosten wurde ein Stundenlohn von 30 Euro angenommen (Ingenieursstundenlohn) [30].

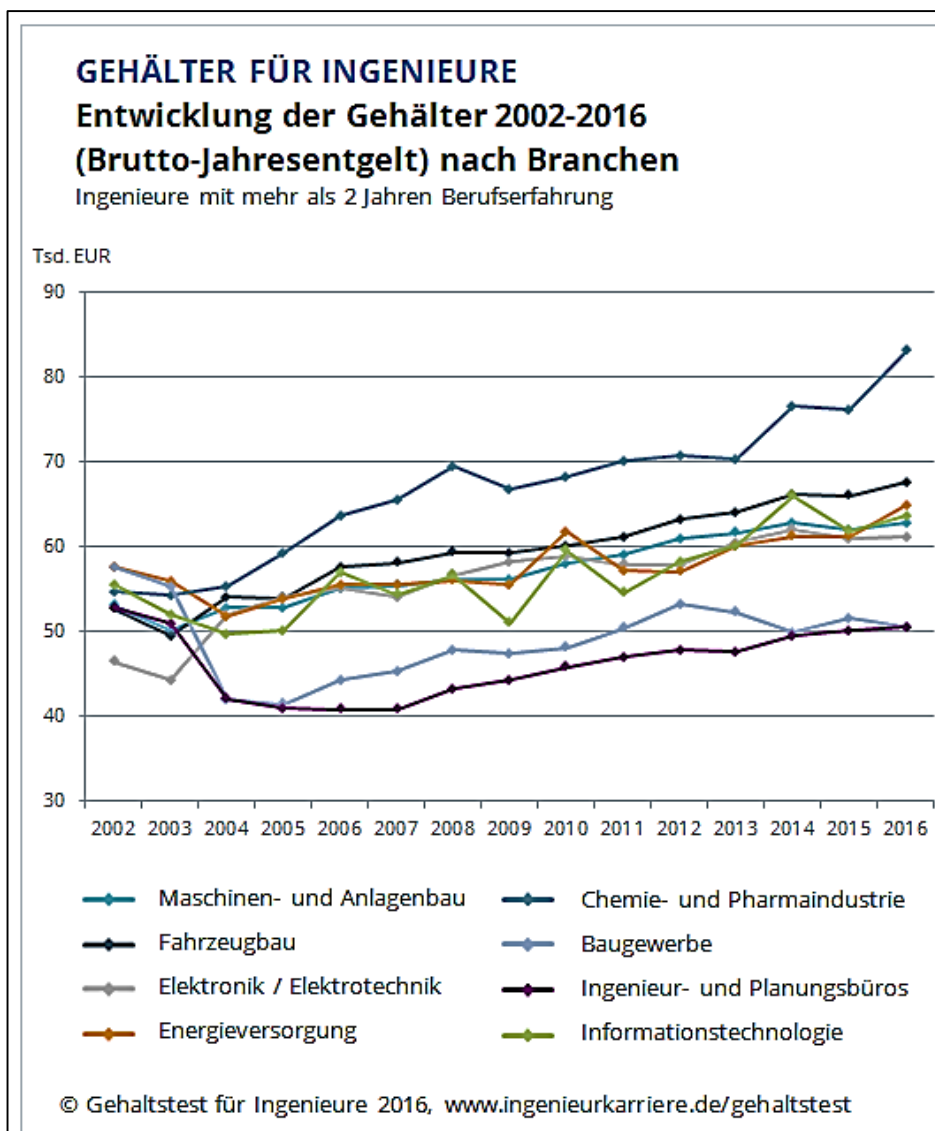


Abbildung 97: Ingenieursgehälter nach Branche von 2002 bis 2016 [30]

8.1 Kostenaufstellung

8.1.1 Stückkosten

Die Stückkosten beinhalten den reinen Warenwert der verwendeten Komponenten.

Tabelle 9: Stückkosten

Menge	Bezeichnung	Einzelkosten [Euro/Stück]	Gesamtkosten [Euro]
4	Spannungsmesskabel	3	12
4	Spannungsmesszangen(Fluke)	5	20
3	Stromwandler(100A/50mA)	10	30
1	LiPo-Akku	15	15
1	UI-Gehäuse	10	10
1	UI-Interface ²	70	70
1	Mess-Gehäuse	25	25
1	Messkarte ³	100	100
1	Arduino-Shield(MC) ⁴	15	15
1	Spannungsteiler(SD-Card)	2	2
1	SD-Card(16GB)	12	12
1	SD-Card-Modul	5	5
1	Netzanschluss(12V=)	8	8
1	Verbindungskabel(UI-Mess 1,5m)	2	2
2	Sub-D-Stecker(weiblich)	1	2
2	Sub-D-Stecker(männlich)	1	2
1	MC Arduino Mega	30	30
1	LCD(20x4)	25	25
1	I ² C-Modul(LCD)	4	4
1	Alu-Koffer	30	30
1	Stecker + Kabel divers ⁵	10	10
Gesamtstückkosten			427

Der reine **Warenwert** der Messeinrichtung hat einen Gesamtwert von **427 Euro**.

² Das UI-Interface entspricht dem Wert der verwendeten Komponenten aus der Stückliste

³ Die Messkarte entspricht dem Wert der verwendeten Komponenten aus der Stückliste

⁴ Das Arduino-Shield entspricht dem Wert der verwendeten Komponenten aus der Stückliste

⁵ Damit sind alle verwandten Anschlusskabel und Anschlussstecker gemeint, die für den Bau der Messeinrichtung verwendet wurden

8.1.2 Arbeitskosten

Die gesamten Arbeitskosten werden zusammengesetzt aus den Entwicklungs- und den Herstellungskosten. Diese werden in den untenstehenden Tabellen zusammengefasst.

a. Entwicklungskosten

Tabelle 10: Entwicklungskosten

Menge	Bezeichnung	Stunden [Std]	Stundenlohn [Euro/Std.]	Gesamtkosten [Euro]
1	UI-Gehäuse	5	30	150
1	UI-Interface	35	30	1050
1	Messgehäuse	8	30	240
1	Messkarte	40	30	1200
1	Verbindungskabel	2	30	60
1	Spannungsteiler	2	30	60
Entwicklungskosten				2760

b. Herstellkosten

Tabelle 11: Herstellkosten

Menge	Bezeichnung	Stunden [Std]	Stundenlohn [Euro/Std.]	Gesamtkosten [Euro]
1	UI-Gehäuse	4	30	120
1	UI-Interface	24	30	720
1	Messgehäuse	5	30	150
1	Messkarte	32	30	960
1	Verbindungskabel	2	30	60
1	Spannungsteiler	1	30	30
Herstellkosten				2040

c. Arbeitskosten

Tabelle 12: Arbeitskosten

Kostenart	Gesamtkosten [Euro]
Entwicklungskosten	2760
Herstellkosten	2040
Arbeitskosten	4800

Die Arbeitskosten belaufen sich bei einem Stundenlohn von 30 Euro und 160 Arbeitsstunden auf insgesamt **4800 Euro**.

8.1.3 Gesamtkosten

Bei den Gesamtkosten sind zunächst alle Kosten zu berücksichtigen, die für die gesamte Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung angefallen sind(unbereinigt).

Tabelle 13: Gesamtkosten unbereinigt

Kostenart	Gesamtkosten [Euro]
Stückkosten	427
Arbeitskosten	4800
Gesamtkosten	5027

Die Gesamtkosten belaufen sich auf **5027 Euro**(unbereinigt). Diese Kosten würden ungefähr in einem Betrieb entstehen, wenn man solch eine Einrichtung dort bauen würde.

Da es sich bei dieser Arbeit um eine Bachelorarbeit handelt, werden die Arbeitskosten unberücksichtigt(bereinigt).

Tabelle 14: Gesamtkosten bereinigt

Kostenart	Gesamtkosten [Euro]
Stückkosten	427
Gesamtkosten	427

Für diese Messeinrichtung entstanden insgesamt Kosten von **427 Euro**. Dieses war nur möglich, da diese Arbeit unentgeltlich anzusehen war.

Zu sehen ist, dass die Stückkosten mit 427 Euro nach den Herstellkosten mit von 2040 Euro und den Entwicklungskosten von 2760 Euro am niedrigsten sind. Daraus kann entnommen werden, dass die Entwicklungskoste höher als die Herstellungskosten sind und die Stückkosten am geringsten Kosten verursachen.

9 Fazit und Ausblick

Die Entwicklung und Herstellung einer mobilen Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung wurde eine Herausforderung für sich. Die Herausforderung bestand darin, die gesammelten Erfahrungen mit der erlernten Theorie der Hochschule zu vereinen und in einer wissenschaftlichen Bachelorarbeit zu verwirklichen. Dabei gab die zuvor gesammelte Erfahrung während des Hauptpraktikums die nötige Motivation und den Antrieb zum Verfassen dieser Abschlussarbeit. Mit dem aktuellen Thema der Energieeinsparung und zunehmenden Einzug der Digitalisierung mit der Industrie 4.0 in die Industrien, wurde die Motivation praktischerweise mit der Herausforderung verknüpft.

Die Herausforderung bestand allerdings nicht nur, eine eigene Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung zu realisieren, sondern die bereits etablierten Marktteilnehmer ausfindig zu machen und ihre Lösungen kennenzulernen. Um vorhandene Lösungen verstehen zu können, sollten ein breites Fundament an theoretischen Grundlagen aufgebaut werden, wobei rechtliche Grundlagen ebenfalls nicht fehlen dürfen. So schreibt der VDI Richtlinien vor, die in Normen festgehalten und eingehalten werden müssen. Für eine Messuntersuchung an elektrischen Anlagen ist grundsätzlich eine dementsprechende Ausbildung vorausgesetzt, wobei auch nach einer fachlichen Anweisung durch eine Elektrofachkraft gearbeitet werden darf.

Die Messeinrichtung selbst und die daraus resultierende wissenschaftliche Arbeit haben einen immensen Erfahrungswert für weitere Projekte mit sich gebracht. Die Aufgabenstellung wurde dabei auch von der technischen, sozialen und finanziellen Sicht bewertet und betrachtet. Dabei war es nicht immer leicht diese Ebenen miteinander wie gewünscht zu vereinbaren. Währenddessen hat man gelernt den sozialen Kontakt mit den Mitarbeitern zu verbessern, technische Kenntnisse enorm zu erweitern und vor allen auf Kosten zu achten, damit ein Projekt überhaupt finanzierbar und realisierbar wird.

Bei der Entwicklung und Herstellung der Einrichtung sind immer wieder unvorhersehbare Ereignisse eingetreten, die in Zukunft besser berücksichtigt werden sollten. Dazu gehörte die verspätete Lieferung elektronischer Komponenten aus China, die das Projekt zeitlich aufhielt. Daher sollte bei kurzterminierten Arbeiten die Ware auf dem heimischen Markt besorgt werden, was wiederum höhere Kosten verursacht. Bei weitangelegten Projekten sollte wegen Kosteneinsparung die Ware in kostengünstigeren Ländern zugekauft werden. Auch die Projektorganisation sollte mit anderen Teilnehmern besser organisiert und abgestimmt werden, wobei von vornherein die Zeitplanung und die Einhaltung der Termine unter den

Projektteilnehmer selbst verabredet werden sollte. Bei der Herstellung wurden ständig kleine Änderungen vorgenommen, für die bei der Zeitplanung kein Puffer eingeplant wurde. Dadurch sank die Qualität der Arbeit, dass wiederum zu mehr Produktionsfehlern wie kalten Lötstellen oder Lötbrücken und somit nach sich ziehender Nacharbeit und Mehrarbeit führte. Daher sollte für jedes Projekt ein ausreichender Puffer eingeplant werden, um unvorhergesehenen Ereignissen besser bewältigen zu können.

Die Leistungsmesseinrichtung wurde bei der Bedienung so einfach wie möglich konstruiert. Dabei durfte man die Übertragbarkeit der Daten auf andere Systeme nicht vernachlässigen und an die Erweiterungsfähigkeit der Einrichtung selbst für die Zukunft vordenken. So wurde auf kostspielige Komponenten verzichtet und eine einfach bedienbare Einrichtung gebaut. Deshalb wurde auch ein leicht programmierbarer Arduino Mega ausgesucht, der sich einfach anwenden lässt. Die gewonnenen Messdaten lassen sich durch die einfache Programmiersprache des Arduinos auf besondere Ziele bzw. Werte anpassen, digitalisieren und analysieren. An dieser Stelle findet der Übergang von der analogen in das digitale Zeitalter sowie die Digitalisierung der Industrie 4.0 statt.

Die Einrichtung ist zudem sicher in der Anwendung und beim Messaufbau. Diese wird in zwei Bereiche eingeteilt. Im ersten Bereich findet die sichere galvanische Trennung und Herabsetzung der gefährlichen Spannung und im zweiten die Bedienung der Messeinrichtung statt. Die gesamte mobile Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung ist bei Bedarf Stromunabhängig, transportfreundlich, platzsparend im Koffer tragbar, schnell und einfach vor Ort auf- und abgebaut, zudem einfach in der Bedienung und sicher in der Handhabung.

Die Gesamtkosten der Messeinrichtung betragen knapp 5000 Euro. Diese Kosten erscheinen auf den ersten Blick sehr hoch zu sein, weil andere Marktanbieter bereits mobile Leistungsmesseinrichtungen ab 1300 Euro anbieten. Da die die Entwicklung einmalig war und bei den Stück- und Herstellkosten enormes Einsparpotential besteht, könnte die selbstgebaute Einrichtung viel günstiger in Zukunft produziert werden. Die Kosten würden nach eigener Überlegung bei 1000 Euro liegen.

Dennoch ist die gebaute Messeinrichtung optimierungsfähig. So könnte die Einrichtung in einem einzelnen Gehäuse untergebracht werden. Den Programmcode sollte zusätzlich auf Schwachstellen untersucht, erweitert bzw. optimiert werden. Der CS5490-Baustein ist ein sehr interessanter Ansatz für weitere Entwicklungs- und Bauvorhaben, bei dem es sich lohnen würde diesen genauer zu untersuchen und auszuprobieren.

Heutzutage werden immer mehr Daten gesammelt, um in die Zukunft schauen zu können. In der Industrie lassen sich viele Arbeitsprozesse mit Messdaten verknüpfen, um diese dementsprechend zu analysieren. Dafür hat die Industrie das innovative Wort „Industrie 4.0“ eingeführt, mit der es ihnen gelingen soll, auf dem globalen Markt konkurrenzfähig bleiben zu können. Mit den Messdaten lassen sich Optimierungsmaßnahmen durchführen, um kostbare Ressourcen einzusparen.

So eine immer teuer werdende Ressource ist die elektrische Energie. Die Kosten je Kilowattstunde steigen ständig. Mit dem Erneuerbaren Energiegesetz(EEG) holen sich viele energieintensive Unternehmen die Energiekosten zurück, wenn sie den Verbrauchsort- und -menge benennen und ein mögliches Einsparpotential vorweisen können. Viele produzierende Unternehmen können sich aber kein teures Messsystem leisten, weil ihnen entweder das Fachpersonal oder schlichtweg die Zeit fehlt, um solch eine Messeinrichtung zu verwenden. Daher schätzen sie ihren Stromverbrauch nur ab. Dadurch entgeht ihnen enormes Einsparpotential. Diese mobile Drehstrom-Leistungsmesseinrichtung würde einem energieintensiven Unternehmen helfen, die „Energiefresser“ aufzudecken und direkt einem Energieverbraucher zuzuordnen, um anschließend nachzudenken, ob durch eine Neuinvestition in eine energiesparendere Anlage, die Energiekosten eingespart werden könnten. So würde eine Umschulung eines Mitarbeiters, diesen dazu befähigen eine solche Energieanalyse mit so einer Messeinrichtung durchzuführen. Die daraus gewonnen Erkenntnisse, könnten bei wichtigen Entscheidungen der strategischen Ausrichtung eines Unternehmens eine Rolle spielen. Weshalb es ratsam ist solche „Energiefresser“ aufzudecken, diese direkt zuzuordnen und mit einfachen Schritten in die Zukunft des Unternehmens zu investieren.

Literaturverzeichnis

- [1] „de.statista.com,“ [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197286/umfrage/umsatzentwicklung-in-der-sensor-und-messtechnik-seit-2004/>. [Zugriff am 21 Juni 2017].
- [2] AMA Verband, „www.ama-sensorik.de,“ [Online]. Available: <http://www.ama-sensorik.de/de/verband/brancheninformationen/quartalsumfragen-2017/>. [Zugriff am 22 Juni 2017].
- [3] Rohde und Schwarz, „http://www.easyflip.co.uk/“ [Online]. Available: http://www.easyflip.co.uk/Farnell_2014_DE/?page=2770. [Zugriff am 20 Juni 2017].
- [4] Rohde und Schwarz, „de.farnell.com/“ Rohde und Schwarz, [Online]. Available: <http://de.farnell.com/hameg/hm8115-2/power-meter-5kw-500v-16a-1khz/dp/5720084#anchorTechnicalDOCS>. [Zugriff am 20 Juni 2017].
- [5] Rohde und Schwarz, „http://shop.rohde-schwarz.com/“ Rohde und Schwarz, [Online]. Available: <http://shop.rohde-schwarz.com/de/r-srhmc8015-1.html>. [Zugriff am 20 Juni 2017].
- [6] PCE Deutschland GmbH, „www.pce-instruments.com/“ PCE Deutschland GmbH, [Online]. Available: https://www.pce-instruments.com/deutsch/messtechnik/messgeraete-fuer-alle-parameter/leistungsmessgeraet-pce-instruments-leistungsmesser-pce-360-det_12420.htm?_list=kat&_listpos=1. [Zugriff am 20 Juni 2017].
- [7] Fluke, „www.conrad.de,“ Fluke , September 2013. [Online]. Available: https://www.conrad.de/de/fluke-1730eu-dreiphasiger-energie-logger-komplettset-4276693-cat-iii-1000-v-cat-iv-600-v-792321.html?gclid=CJ7-reLLzNQCFS6T7QodUxQOJA&insert_kz=VQ&ef_id=WUkH4QAAAAP5vre:20170620140454:s. [Zugriff am 20 Juni 2017].
- [8] AMPROBE, „www.reichelt.de/“ AMPROBE, 18 Januar 2008. [Online]. Available: https://www.reichelt.de/?ARTICLE=148818&PROVID=2788&wt_mc=amc141526782519998&gclid=CMOG9vytzNQCFe4V0wodNaANig. [Zugriff am 20 Juni 2017].
- [9] GOSSEN METRAWATT, „www.voelkner.de/“ GOSSEN METRAWATT, 2007. [Online]. Available: https://www.voelkner.de/products/877959/Gossen-Metrawatt-Mavowatt-30-Flex-Paket-Netz-Analysegeraet-Netzanalysator-M810F.html?ref=43&products_model=W734991&gclid=CKP774S4zNQCFe4V0wodK2AHzQ. [Zugriff am 20 Juni 2017].
- [10] VDI, „www.vdi.de,“ Verein Deutscher Ingenieure, [Online]. Available: <https://www.vdi.de/technik/richtlinien/was-sind-vdi-richtlinien/>. [Zugriff am 20 Juli 2017].
- [11] Europa Lehrmittel, Fachkunde Elektrotechnik, Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel Verlag, 2012.

- [12] P. Riese, „www.ehrlich-kg.de,“ FRAKO Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH, März 2012. [Online]. Available: http://www.ehrlich-kg.de/pdf/FRAKO_handbuch_blk.pdf. [Zugriff am 15 Juni 2017].
- [13] T. Mühl, Einführung in die elektrische Messtechnik, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [14] T. Mühl, Elektrische Messtechnik, Aachen: Springer Verlag, 2016.
- [15] Dr.-Ing. Paul Christiani GmbH & Co. KG, „www.christiani.de,“ [Online]. Available: http://www.christiani.de/pdf/77961_probe.pdf. [Zugriff am 29 Juni 2017].
- [16] Elektronik Kompendium, „www.elektronik-kompendium.de,“ [Online]. Available: <http://www.elektronik-kompendium.de/forum/search.php>. [Zugriff am 22 Juli 2017].
- [17] ELV, „www.elv.de,“ [Online]. Available: <https://www.elv.de/bau-und-bediungsanleitungen.html/Warengruppe/8>. [Zugriff am 20 Juli 2017].
- [18] ELV, „www.elv.de,“ [Online]. Available: <https://www.elv.de/elektronikwissen/messung-der-wirkleistung.html>. [Zugriff am 20 Juli 2017].
- [19] ELV, „www.files.elv.com,“ [Online]. Available: https://files.elv.com/bilder/journal/2014_04/03/132157_hm_funk_schaltaktor_teil2.pdf. [Zugriff am 23 Juli 2017].
- [20] S. G. Tietze, Halbleiter-Schaltungstechnik, Erlangen und München: Springer Verlag, 2012.
- [21] „www.wikipedia.de,“ [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/wiki/Eagle_\(Software\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Eagle_(Software)). [Zugriff am 20 Juli 2017].
- [22] Funduino, „www.funduino.de,“ [Online]. [Zugriff am 23 Juli 2017].
- [23] arduino, „www.arduino.cc,“ [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/reference/SPI>. [Zugriff am 23 Juli 2017].
- [24] conrad, „www.conrad.de,“ conrad elektronik, [Online]. Available: <https://www.conrad.de/de/universal-gehaeuse-180-x-205-x-70-polystyrol-eps-schwarz-1-st-523380.html>. [Zugriff am 17 Juli 2017].
- [25] conrad, „www.conrad.de,“ conrad elektronik, [Online]. Available: <https://www.conrad.de/de/universal-gehaeuse-250-x-160-x-57-abs-hellgrau-bopla-euomas-et-239-f-1-st-535692.html?sc.ref=Product%20Details>. [Zugriff am 17 Juli 2017].
- [26] U. Sommer, Arduino Mikrokontroller-Programmierung mit Arduino, Haar bei München: Franzis Verlag GmbH, 2013.
- [27] Wikipedia, „www.wikipedia.org,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/D-Sub>. [Zugriff am 17 Juli 2017].

- [28] „www.ingenieurkarriere.de,“ [Online]. Available: <http://www.ingenieurkarriere.de/gehaltstest/gehaelter>. [Zugriff am 19 Juli 2017].
- [31] P. Schnabel, Elektronik-Fibel, 2007.
- [32] T. Mühl, Einführung in die elektrische Messtechnik, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [33] Fachkunde Elektrotechnik, Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel Verlag, 2012.
- [34] Wikipedia, „www.wikipedia.org,“ [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Stromwandler#/media/File:Stromwandler_Zeichnung.svg. [Zugriff am 28 Juni 2017].
- [35] Uni Goettingen, „lp.uni-goettingen.de,“ [Online]. Available: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4245>. [Zugriff am 28 Juni 2017].
- [36] ELEXBO A CAR ENGINEERING, „docplayer.org,“ [Online]. Available: <file:///C:/Users/Harald/Downloads/ELEXBO%20A-Car-Engineering.pdf>. [Zugriff am 28 Juni 2017].

Anhang

- A: Schaltplan UI-Interface
- B: Layout UI-Interface
- C: Bestückungsplan UI-Interface
- D: Stückliste UI-Interface
- E: Schaltplan Messkarte
- F: Layout Messkarte oben und unten
- G: Bestückungsplan Messkarte oben
- H: Bestückungsplan Messkarte unten
- I: Stückliste Messkarte
- J: Schaltplan Arduino-Shield
- K: Layout + Bestückungsplan Arduino-Shield
- L: Stückliste Arduino-Shield
- M: Stückliste Spannungsteiler
- N: Stromwandler YHDC 100A/50mA
- O: Programmcode Arduino
- P: CD-ROM mit Abschlussarbeit_BA_Galiardt_2017 im PDF-Format