

- ● ● ● ● ● Fachhochschule Köln
- ● ● ● ● University of Applied Sciences Cologne
- ● ● ● ●
- ● ● ● ● 07 Fakultät für Informations-, Medien-  
und Elektrotechnik
- ● ●

## **Bachelorarbeit**

### **Titel:**

**Hardware für eine automatische Messdatenerfassung  
eines Synchrongenerator-Messstandes**

**Ain Haddadi, Taregh**

**Studiengang: Elektrotechnik**  
**Vertiefung: Energietechnik**  
**Schwerpunkt: Elektrische  
Messtechnik und  
Leistungselektronik**  
**Matrikelnummer: 11057262**

**Referent: Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt**  
**Korreferent: Prof. Dr. Ing. Christof Humpert**

**Abgabedatum: 13.01.2014**

## I. Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur, die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen verwendet. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

Unterschrift

## II. Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Eberhard Waffenschmidt für die Betreuung während meiner Abschlussarbeit bedanken. Er ermöglichte mir diese Arbeit durchzuführen und war während der Durchführung ein sehr wichtiger Ansprechpartner für mich.

An dieser Stelle möchte ich mich auch meinen Freund und Kommilitonen B.Sc. Sertac Mustu bedanken, der mich immer wieder motivierte im Laboratorium.

Meinen Dank an Herrn Prof. Dr. Ing. Christof Humpert für das Koreferat meiner Arbeit. Weiterhin Dank an Kommilitonen B.Sc. Christian Bauer, Herr B.Sc. Jochen Reichert, Herr Dipl. Ing. Schuhmacher und Frau Dipl. Ing. Goldenberg SMD Labor Löten.

Ich möchte mich natürlich auch in meinem Umfeld und Freundeskreis bedanken. Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während der Arbeit voll unterstützte, allen voran meine Ehefrau Peggy Ain Haddadi, die bei allen Schwierigkeiten unterstützend neben mir stand.

### III. Inhaltsverzeichnis

I. Erklärung.....	i
II. Danksagung.....	ii
III. Inhaltsverzeichnis.....	iii
1 Einleitung und Aufgabenstellung.....	1
2 Konzept des Gesamtsystems.....	2
2.1 Ablauf des Hauptstromkreislaufplans (Ist Zustand).....	2
2.2 Spezifikation der erforderlichen Messgrößen.....	5
2.2.1 Konkretisierung der Spannungskanäle.....	5
2.2.2 Konkretisierung der Stromkanäle.....	6
2.2.3 Die Messgrößentabelle.....	6
2.3 Hauptstromkreislaufplan (Soll Zustand).....	7
2.4 Struktur der Elektrischen Messeinrichtung (Soll Zustand).....	10
2.5 Rahmenbedingungen für die Aufnehmer der Messgrößen.....	10
2.5.1 Räumliche Aufteilung der Gruppierungen.....	10
2.5.2 Das Messsignal zu der Netzwerkkarte.....	11
2.5.3 Bestimmung der Frequenz-Bandbreite.....	13
2.5.4 Konkretisierung der Galvanischen-Trennung.....	13
2.5.5 Bestimmung der Hilfsenergie.....	14
3 Auswahl der Messverfahren.....	15
3.1 Die Strommessung.....	15
3.1.1 Der Shunt.....	15
3.1.2 Die Hallsensor.....	15
3.1.3 Festlegung der Strommessung.....	16
3.2 Die Spannungsmessung.....	17
3.2.1 Der Übertrager.....	17
3.2.2 Der Optokoppler.....	17
3.2.3 Festlegung der Spannungsmessung.....	19
4 Entwicklung der Messumformer.....	20
4.1 Platinenoberfläche und Anwendungssoftware.....	20
4.2 Auswahl der Sensoren.....	20
4.2.1 Optokoppler-Sensoren von Avago.....	21
4.2.2 Hallsensoren von Allegro und Tamura.....	22
4.2.3 Fazit der Sensoren Auswahl.....	23
4.3 Marktanalyse der Sensoren.....	23
4.3.1 Fazit der Marktanalyse.....	25
4.4 Bestimmung der Messkanäle.....	25
4.4.1 Blockdiagramm der Messkanäle.....	25
4.4.2 Die Spannungsteiler.....	29
4.4.3 Erwartende Messsignale.....	31
4.5 Die Schaltungen.....	33
4.5.1 Die Sensoren.....	33
4.5.2 Spannungsteiler.....	34
4.5.3 Tiefpass-filter TP1.....	34
4.5.4 Versorgungsspannung.....	35
4.6 Platinenlayout und Gehäuse.....	36
4.6.1 Platinenlayout.....	36
4.6.2 Gehäuse.....	41

<u>5 Messungen der Messumformer.....</u>	<u>43</u>
<u>5.1 Versorgungsspannung.....</u>	<u>43</u>
<u>5.1.1 Versuchsaufbau.....</u>	<u>43</u>
<u>5.1.2 Messergebnisse.....</u>	<u>43</u>
<u>5.2 Messungen der Übertragungsfaktoren.....</u>	<u>45</u>
<u>5.2.1 Versuchsaufbau.....</u>	<u>46</u>
<u>5.2.2 Messergebnisse.....</u>	<u>46</u>
<u>5.3 Grenzfrequenzmessungen.....</u>	<u>53</u>
<u>5.3.1 Messergebnisse.....</u>	<u>53</u>
<u>6 Auswertung und Ausblick.....</u>	<u>55</u>
<u>I. Abbildungsverzeichnis.....</u>	<u>56</u>
<u>II. Tabellenverzeichnis.....</u>	<u>59</u>
<u>III. Literaturverzeichnis.....</u>	<u>60</u>
<u>Anhang.....</u>	<u>61</u>
<u>1 Datenblätter.....</u>	<u>62</u>
<u>1.1 Hallsonde ACS756.....</u>	<u>63</u>
<u>1.2 Hallsonde ACS712.....</u>	<u>64</u>
<u>1.3 Hallsonde L18P***12.....</u>	<u>65</u>
<u>1.4 Trennverstärker HCPL-7840.....</u>	<u>66</u>
<u>1.5 Teilauszug Optokoppler HCNR-200.....</u>	<u>67</u>
<u>1.5.1 Seite 1 Description und Applications.....</u>	<u>67</u>
<u>1.5.2 Seite 13 Figure 18. Bipolar isolation amplifier.....</u>	<u>68</u>
<u>1.5.3 Seite 14 Quellcode Spicemodel für Ltspice.....</u>	<u>68</u>
<u>1.6 Teilauszüge Widerstandskit 0805.....</u>	<u>70</u>
<u>1.6.1 Ratings und Power Ratings.....</u>	<u>70</u>
<u>1.7 Fibox Gehäuse CAB.....</u>	<u>71</u>
<u>2 Tabellarische Berechnungen für die Marktanalyse.....</u>	<u>72</u>
<u>3 KiCad Schaltpläne.....</u>	<u>73</u>
<u>4 KiCad Platinenlayouts.....</u>	<u>78</u>
<u>5 Messwertetabelle Spannungsmessungen.....</u>	<u>84</u>
<u>6 Messwertetabelle Strommessungen.....</u>	<u>85</u>
<u>7 Messwertetabelle Frequenzmessungen.....</u>	<u>86</u>

## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Für den existierenden Messstand eines Maschinensatzes, soll eine neue Messdatenerfassungshardware aufgebaut werden. Bestehend aus einer Antriebsmaschine (Drehstrom-Asynchronmaschine) und zwei fremderregten Gleichstrommaschinen, von denen eine mit der Antriebsmaschine und die andere mit der Synchronmaschine gekoppelt ist. Die Synchronmaschine kann im Inselbetrieb oder nach Synchronisation am Drehstromnetz betrieben werden.

Die Messdatenerfassungen werden mittels einer Netzwerkkarte an einem PC-Labor softwaretechnisch bearbeitet, für die ein weiterer Bachelorarbeiter zuständig ist. Der Messstand ist zu modernisieren für eine abspeicherbare Dokumentierung der Messergebnisse. Hiermit ergeben sich dann zeitaufgelöste Gesamtmessungen, die erweiterte Simulation verschiedene Fälle erlaubt. Der bisherige Zustand des Messstand zeigt zu Lehrzwecken den Versuchsteilnehmern wie ein Synchronisationsprozess eines Inselnetzes (Mikrosystem), durch zusammenschalten an einem großen Netz (Makrosystem) erfolgt. Dieses schließt auch bei einem Ausfall (Blackout) des Stromnetzes einen Synchronisationsprozess mit ein. Der modernisierte Messstand ist für das Untersuchen einer dezentralen Einspeisung bedingt durch einen Wechselrichter geeignet. Die Eignung ergibt sich aus der modernen Messtechnik, die eine zeit diskrete Signalerfassung ermöglicht, durch Sensoren mit Frequenzbandbreite im Bereich der Hochfrequenz. Somit ist bei Netzschwankungen die Veränderung der Spannung oder Frequenz ersichtlich, was in welchem Zeitraum passiert. Hierbei soll der moderne Messstand zeitaufgelöst Spannung und Strom erfassen und diese dann am PC-Labor auf der Betriebssystem Festplatte abspeichern.

Aufgrund der Energiewende werden immer mehr elektronische Wechselrichter im Bereich der erneuerbaren Energie für das einspeisen von Energie ins Netz angewendet. Deswegen könnte der neue moderne Messstand dies auf Netzstabilität untersuchen, wenn ein großer Anteil an Wechselrichter eingesetzt wird.

Für die Umsetzung des zu modernisierten Synchrongenerator-Messstand ist ein Konzept des Gesamtsystem darzustellen. Eine Spezifikation der Messgrößen ist zu bestimmen, d. h. anhand der Kenndaten der Leistungsschilder der gelagerten Maschinensätze ggf. durch eine Berechnung der Leistung für den Zwischenstromkreis. Es werden jeweils ein paar Aufnehmer der Messgrößen für Strom- und Spannungsmessung mit Galvanischer-Trennung und einer hohen Frequenz-Bandbreite, die für elektronische Wechselrichter geeignet sind, erklärt und bestimmt. Hierbei ist das Messverfahren der Messgrößenaufnehmer und die Betriebsspannungs-Versorgung für die Messgeräte zu bestimmen. Danach ist die Entwicklung der Messumformer anzustreben. Hierbei soll eine Auswahl der Sensoren verglichen werden mit den erforderlichen Frequenzbandbreite und einer zusätzlichen Marktanalyse. Dann sind die Messkanäle zu bestimmen und die Schaltungen zu erklären. Es ist ein Platinenlayout zu erstellen und dieses aufzubauen bzw. erklären. Die Platine ist dann in einem Gehäuse mit der zugehörigen Hilfsenergie einzubauen. Auch ist eine Messung der Messumformer erforderlich für den Übertragungsfaktor und der Grenzfrequenzmessungen.

### 2 Konzept des Gesamtsystems

Für die Modernisierung einer Messeinrichtung ist ein Gesamtkonzept zu erstellen. Hierbei werden die Modernisierungs-Maßnahmen der alten Messeinrichtung (Unterkapitel 2.1) zu dem neuen Zustand der Messeinrichtung (Unterkapitel 2.3) und Spannungsversorgung (Unterkapitel Fehler: Referenz nicht gefunden) erläutert. Beginnend mit der Spezifizierung (Unterkapitel 2.2) der Messgrößen für ein Erklärungsansatz der galvanischen Trennung, Anzahl der Messgrößen und Messstellen Positionen innerhalb Hauptstromkreislaufplan. Danach folgt eine Gruppenzuordnung (Unterkapitel Fehler: Referenz nicht gefunden) der jeweiligen Messgrößen auf die jeweiligen Maschinen. Mittels Blockschaltbild soll ein besserer Überblick von Messgröße, Messsignal und dem Empfänger dargestellt und kurz erläutert werden.

#### 2.1 Ablauf des Hauptstromkreislaufplans (Ist Zustand)

An dieser Stelle ist der gelagerte Maschinensatz mit Synchronmaschine für die Synchronisation der Leistungsrückspeisung in dem Netzstrom zu erklären. Die Asynchronmaschine M1 (s. Abbildung 2.1) reagiert physikalisch auf Netzfrequenzänderungen, somit ist sie als Asynchronmotor für einen mechanischen Antrieb zu betrachten. Für den bestehenden Messstand wird eine Phasenstrommessung  $I_{ASyn}$  zu dem Asynchronmotor bemessen, da eine symmetrische Phasenstrommessung an den Phasenlaborleitungen zu erwarten ist. Die Gleichstrommaschine M2 (s. Abbildung 2.1) ist mit dem Asynchronmotor mechanisch gekoppelt, wird von dieser angetrieben und erzeugt Gleichspannung bzw. Gleichstrom im Zwischenstromkreis als Gleichstromgenerator mit der Gleichstrommaschine M3 (s. Abbildung 2.1). Da es sich bei dem Gleichstromgenerator M2 um einen Nebenschlussgenerator handelt, ist zuerst das Erregerfeld (man spricht auch von einer Erregerstromspannung bzw. Erregerstrom) des Gleichstromgenerator M2 zu versorgen mit Gleichstrom aus einem galvanisch getrennten Stell-Trenntransformator. Durch zwei Schiebewiderstände R1 und der Strommessung  $I_{EGen}$  für den Gleichstromgenerator M2 und den Schiebewiderstand R2 und der Strommessung  $I_{EMot}$  für die Gleichstrommaschine M3, ist direkt der Erregerstrom abzulesen und einzustellen. Im Zwischenstromkreis mit Gleichstromgenerator M2 und der Gleichstrommaschine M3 ist eine Strommessung  $I_A$  zu bemessen, damit die Stromstärke der Leistungsschilder Kenndaten eingehalten werden kann und Veränderungen im Zwischenstromkreis beobachtet werden können. Die Gleichstrommaschine M3 ist mechanisch mit der Synchronmaschine M4 (s. Abbildung 2.1) verbunden und treibt diese an, somit ist sie als ein Gleichstrommotor zu betrachten. Durch Veränderungen der Schiebewiderstände R1 und R2 kann man die Erregerströme für die Gleichstrommaschinen M2 bzw. M3 variieren. Hiermit kann man die Synchronmaschine steuern. Sobald der Erregerstrom  $I_{FSyn}$  das Erregerfeld der Synchronmaschine durch einen getrennten Stell-Trenntransformator versorgt, wirkt die Synchronmaschine als Synchrongenerator. Die Strommessung  $I_{FSyn}$  ist für die Beobachtung und Einhaltung der Leistungsschilder Kenndaten erforderlich.

Damit eine synchronisierte Rückspeisung der elektrischen Leistung ausgehend

## 2 Konzept des Gesamtsystems

---

von dem Synchrongenerator durchgeführt werden kann, ist dieser auf Leistungsrückspeisung, Spannungssymmetrie, Stromsymmetrie und Frequenzsymmetrie zu bemessen, zu beobachten und zu erfassen erforderlich.  $I_1$  und  $I_2$  sind die Phasenströme der Laborrückleitungen zu dem Netzstrom. Es werden jeweils zwei Strommessungen durchgeführt, da beim bestehenden Messstand nur eine symmetrische Last ausgegangen wird. Durch die Aronschaltung (s.Abbildung 2.1, [2],[6]), die für Symmetrische Lasten geeignet ist, sind die elektrischen Leistungsrückspeisungen zu bemessen, mit den zwei Leistungsmessgeräten  $P_1$  und  $P_2$ . Dadurch das eine symmetrische Last zu erwarten ist, ist die Spannungsmessung  $U_{syn}$  eingesetzt worden. Aufgrund der Dunkelschaltung (s.Abbildung 2.1, [2],[6]) ist eine direkt sichtbar Einstellung mit drei Lampen für jede einzelne Phasenspannung möglich. Denn sie reagieren physikalisch auf symmetrische Phasenspannung und Frequenzen.



## 2 Konzept des Gesamtsystems

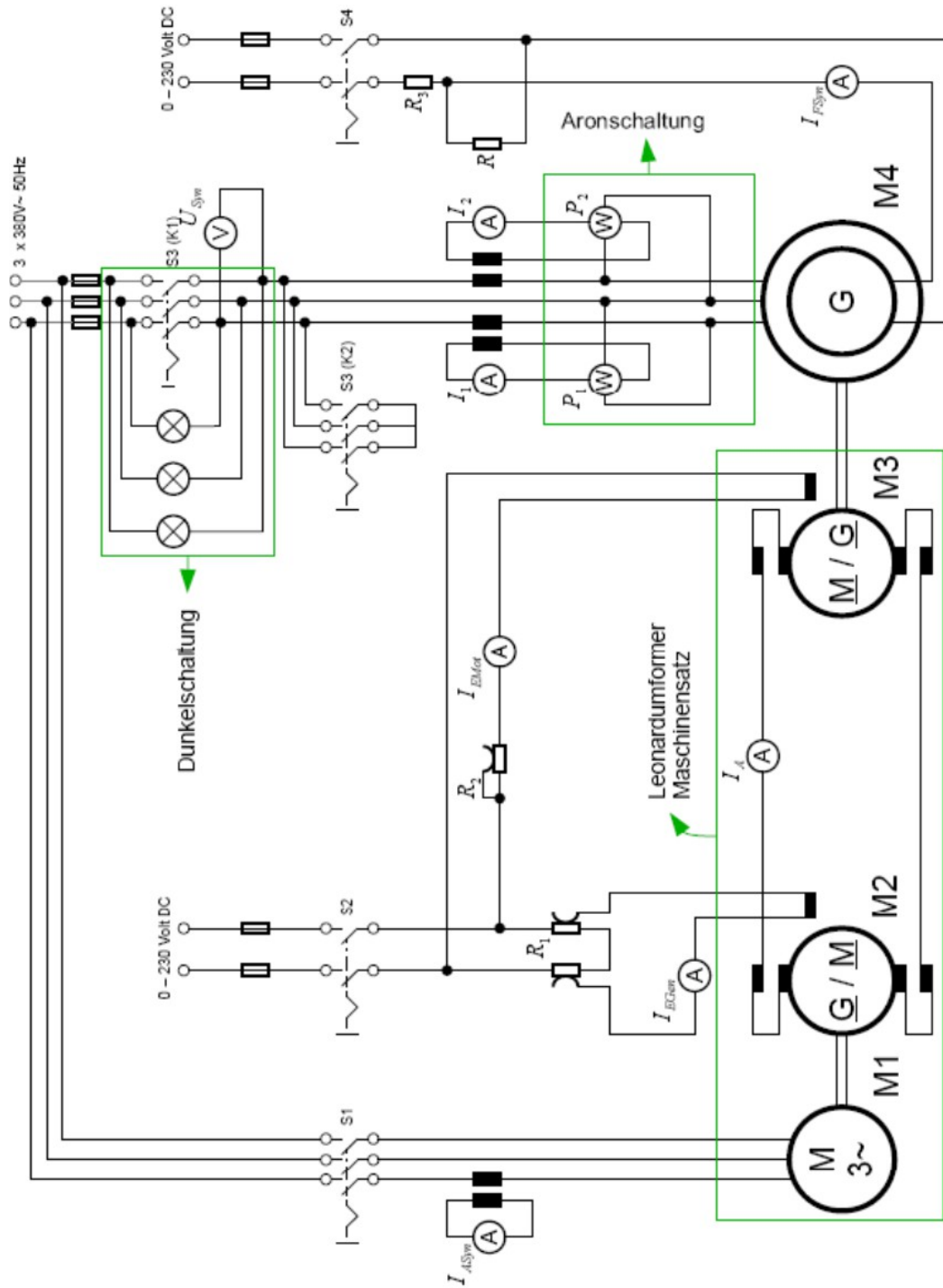


Abbildung 2.1: Hauptstromkreislaufplan für den bestehenden Messtand mit analogen Zeigermessgeräten

## 2 Konzept des Gesamtsystems

### 2.2 Spezifikation der erforderlichen Messgrößen

Die erforderlich Messgrößen sind alle sinnvolle elektrische Spannungs- und Strommessungen für die Berechnung der jeweiligen Elektrischen Leistungen. Die zu erwartende elektrische Spannung oder Strom der Messgröße wird durch die Kenndaten der Leistungsschilder (s. Abbildung 2.1) für ihre dauerhaften zulässigen Betrieb definiert. Somit sind die Spannungs- und Stromkanäle zu bestimmen in Abhängigkeit des Hauptstromkreislaufplans (Ist Zustand). Das heißt es werden die Schaltungen die Spannungsrichtig und Stromrichtig erhalten bzw. erweitert. Damit die Messgrößen übersichtlicher gelesen werden können, ist eine Messgrößentabelle erforderlich. Die räumliche Aufteilung der Messgrößenaufnehmer ist für die Trennung von Drehstrom bzw. -spannung (AC) und Gleichstrom bzw. -spannung (DC) umzusetzen.

Gleichstrommaschine (M3)	
Fachhochschule Köln	25891
Hersteller	Siemens
Gen	4GA2085
Nr.E	178043504001
Bauf	B3
Nennspannung	220 V
Nennstrom	30 A
Nenndrehzahl	1500 U/min
Nennleistung	7 kW
Erregung VDE 0530/66	
Erregerspannung	110 V
Erregerstrom	0,71 A
Iso.Klasse	B
Schutzklasse	P 22

Synchronmaschine (M4)					
Hersteller	Siemens				
Typ	1FA3 144 B3				
Schutzklasse	P 22				
3 ~ Mot. Nr.N	982474				
Iso.Klasse	B				
Nennaten Sternschaltung VDE 0530					
Nennfrequenz	Nennspannung	Nennstrom	Nennleistung	Nennwirkungs-faktor	Nenndrehzahl
50 Hz	380 V	21 A	12,5 kW	1	1500 U/min
Erregung					
Erregerspannung	Erregerstrom	Gew.			
80 V	9,4 A	0,13 t			

Asynchronmaschine (M1)	
Hersteller	Siemens
3 ~ Mot. Typ	1RA6 164-4AB 20
DIN-Baugr.	160 M
Schutzklasse	23
Nr.	31017902 / 1
Nennaten Dreieckschaltung	
Nennspannung	380 V
Nennstrom	23 A
Nennleistung	41 kW
Nennwirkungs-faktor	0,85
Nenndrehzahl	1425 U/min
Nennfrequenz	50 Hz
Iso.Klasse	B

Gleichstrommaschine (M2)			
Typ	1GA3 164-5NJ10_6JE0-Z		
Hersteller	Siemens		
NoN	692629 B3		
Iso.Klasse	B3		
Schutzklasse	23 S		
Nebenschlussmotor VDE 0530/1,72 FG			
Nennaten FG VDE 0875			
Nennspannung	Nennstrom	Nenndrehzahl	Nennleistung
148 V ... 400 V	35 A ... 57 A	660 U/min bis 1980 U/min	4,1 kW bis 20 kW
400 V	57 A ... 59 A	1980 U/min bis 3800 U/min	20 kW
Fremd-Err./excit.			
Nennspannung	Nennstrom		
180 V ... 73 V	1,9 A ... 0,8 A		
VDB 3 ~ 380 V, 50 Hz			

Abbildung 2.2: Leistungsschilder mit Kenndaten der elektrischen Maschinen M1 bis M4

#### 2.2.1 Konkretisierung der Spannungskanäle

Die Spannungskanäle erhalten ihren zulässigen Nennbetrieb aus den Kenndaten der Leistungsschilder. Hierbei wird die Nennfrequenz  $f = 50\text{Hz}$  und die Nennspannung  $U_N$  definiert. Die Nennspannungen sind auch um eine relative Nennspannung  $U_{Nr}$  zu erweitern. Hiervon sind Die Wechselspannungen und Gleichspannungen (angeschlossen an einem Trenntransformator), bis auf

## 2 Konzept des Gesamtsystems

---

die Zwischenkreisspannung betroffen. Hierfür gilt folgende Gleichung

$$U_{Nr} = U_N \cdot (\pm 0,1) \quad . \quad (2.1)$$

Auch ist der relative Nennbetrieb mit dem Crestfaktor  $\sqrt{2}$  für den Scheitel Spannungswert zu berechnen (siehe Abbildung 2.2). Es gilt also

$$U_P = U_{Nr} \cdot \sqrt{2} \quad . \quad (2.2)$$

Es ist eine zusätzliche Laborleitung in blauer Farbe von dem Sternpunkt am Motorklemmkasten des Synchrongenerators zu dem Drehstromnetz zu verlegen. Somit kann man die Phasenspannungen vom Netz zu Nullleiter und Synchrongenerator Motorklemmkasten zu Nullleiter messen. Dies hat den Vorteil, das durch den Nullleiter eine symmetrische Phasenspannung vorliegt.

Damit eine elektrische Leistung berechnet werden kann, ist es notwendig Strom und Spannung an dem jeweiligen Messpunkt messdatentechnisch zu erfassen. Somit werden alle Messpunkte aus der Abbildung 2.1 um eine Strommessung erweitert. Somit ergeben sich insgesamt 10 Spannungsmesskanäle.

### 2.2.2 Konkretisierung der Stromkanäle

Die Stromkanäle erhalten ihren zulässigen Nennbetrieb aus den Kenndaten Leistungsschilder siehe Abbildung 2.2. Hierbei wird die Nennfrequenz  $f = 50\text{Hz}$  und der Nennstrom  $I_N$  definiert. Aufgrund der Belastung des Messstandes ist der Nennstrom mit dem Crestfaktor  $\sqrt{2}$  für den Scheitel Stromscheidenwert und einem Sicherheitsfaktor von 1,25 zu berechnen (siehe Abbildung 2.2). Es gilt also

$$I_P = I_N \cdot 1,25 \cdot \sqrt{2} \quad . \quad (2.3)$$

Damit die Elektrische Leistung berechnet werden kann, ist es notwendig Strom und Spannung an dem jeweiligen Messpunkten die Messdatentechnisch zu erfassen. Somit werden alle Messpunkte aus der Abbildung 2.1 um eine Spannungsmessung erweitert.

Es ist an dieser Stelle der Maximale Effektive Bemessungsstrom der Laborleitung CAT III 32A/1000V bei dem Phasenstrom zu beachten. Wenn dieses nicht beachtet wird, entsteht ein Leitungsbrand. Auch hier bilden sich insgesamt 10 Strommesskanäle.

### 2.2.3 Die Messgrößentabelle

Die Messgrößentabelle stellt durch eine tabellarische Ordnung eine verbesserte Übersicht für die Messgrößen dar. Hiermit kann man die Umrechnungen der jeweiligen Spitzen und relative elektrischen Spannungs- oder Stromwerte wiedergeben.

Die Zuweisungen der jeweiligen BNC-2111 Anschlussblöcke sind an dieser Messgrößentabelle wiederzuerkennen s. Tabelle 2.1.

## 2 Konzept des Gesamtsystems

Es ist auch zu erkennen das die DC Messgrößen einen größeren numerischen Abstand zu den AC Messgrößen vorweisen. Das hat damit zu tun, das ein Anschlussblock für die AC Messungen bzw. Drehstrommessungen gedacht ist. Für die DC Messungen der Erreger- und Zwischenkreisspannungen wird das andere Anschlussblock zugewiesen.

Für eine bessere Zuordnung der Spannungs- und Strommessungen der jeweiligen elektrischen Maschinen sind Gruppierungen aufgelistet.

Die Indexbezeichnungen der Messgrößen ergeben sich aus den jeweiligen Messpunkten. Das heißt z.B.  $U_{10}$  ist die Messgröße an dem Messpunkt von der Phasenleitung L1 (Netzstrom) zu dem Nullleiter N.

Messgröße	Messgrößen Beschreibung	$I_N / A$	$I_p / A$	$U_N / V$	$U_{Nr} / V$	$U_p / V$	f / Hz	BNC-Kanal	Gruppe
$U_{10}$	Phasenspannung des Netzes gegen Nullleiter	-	-	230 (AC)	207 – 253 (AC)	293 – 357 (AC)	50	AI 0	1
$U_{20}$		-	-	230 (AC)	207 – 253 (AC)	293 – 357 (AC)	50	AI 1	1
$U_{30}$		-	-	230 (AC)	207 – 253 (AC)	293 – 357 (AC)	50	AI 2	1
$U_{syn10}$	Phasenspannungen der Synchronmaschine gegen Null-Leiter bzw. Mittelleiter	-	-	230 (AC)	207 – 253 (AC)	293 – 357 (AC)	50	AI 6	2
$U_{syn20}$		-	-	230 (AC)	207 – 253 (AC)	293 – 357 (AC)	50	AI 7	2
$U_{syn30}$		-	-	230 (AC)	207 – 253 (AC)	293 – 357 (AC)	50	AI 8	2
$U_{exc syn}$	Erregerspannung der Synchronmaschine	-	-	0...80 (DC)	72 – 88 (DC)	-	50	AI 17	3
$U_{exc mot}$	Erregerspannung des Gleichstrommotors	-	-	0...110 (DC)	99 – 121 (DC)	-	50	AI 16	4
$U_{exc gen}$	Erregerspannung des Gleichstromgenerators	-	-	0...180 (DC)	162 – 198 (DC)	-	50	AI 21	5
$U_{DC}$	Gleichstrom Zwischenkreisspannung	-	-	0...400 (DC)	-	-	50	AI 23	6
$I_{syn1}$	Phasenströme der Synchronmaschine	21 (AC)	37,5 (AC)	-	-	-	50	AI 9	2
$I_{syn2}$		21 (AC)	37,5 (AC)	-	-	-	50	AI 10	2
$I_{syn3}$		21 (AC)	37,5 (AC)	-	-	-	50	AI 11	2
$I_{asy1}$	Phasenströme der Asynchronmaschine	23 (AC)	40 (AC)	-	-	-	50	AI 3	1
$I_{asy2}$		23 (AC)	40 (AC)	-	-	-	50	AI 4	1
$I_{asy3}$		23 (AC)	40 (AC)	-	-	-	50	AI 5	1
$I_{exc syn}$	Erregerstrom der Synchronmaschine	0 A...9,4 (DC)	-	-	-	-	50	AI 18	3
$I_{exc mot}$	Erregerstrom des Gleichstrommotors	0 A...0,71 (DC)	-	-	-	-	50	AI 19	4
$I_{exc gen}$	Erregerstrom des Gleichstromgenerators	0 A...1,9 (DC)	-	-	-	-	50	AI 20	5
$I_{DC}$	Gleichstrom Zwischenkreisstrom	-50 A...+50 (DC)	-	-	-	-	50	AI 22	6

Tabelle 2.1: Messgrößentabelle aus den Kenndaten Leistungsschilder der gelagerten elektrischen Maschinen

### 2.3 Hauptstromkreislaufplan (Soll Zustand)

Damit der Hauptstromkreislaufplan (Soll Zustand) nachträglich bearbeitet werden kann, ist dieser mit der frei erhältlichen Software OpenOffice 4.0 Draw gezeichnet worden. Somit ist der grobe Hauptstromkreislaufplan vorhanden. Es sind nun die alten Messstellen mit den neuen Messstellen aus der Messgrößentabelle (s. Tabelle 2.1) in den Hauptstromkreislaufplan (Ist Zustand) zu ersetzen bzw. erweitern.

Durch die Indexbezeichnungen der jeweiligen Messgrößen ist die Zuordnung schneller ausgefallen. Damit die Gruppierungen 1 bis 6 ersichtlicher sind, ist

## 2 Konzept des Gesamtsystems

---

eine Punkt Strich Umrandung der jeweiligen eingeschlossenen Messgrößen durchgeführt worden. Für eine direkte Zuordnung der Messgrößen, sind die jeweiligen Ausgangssignale (BNC-Kanäle) AI 0-11 und AI 17-23 (s.Abbildung 2.3) an der Punkt Strich Umrandung aufgeführt.

## 2 Konzept des Gesamtsystems

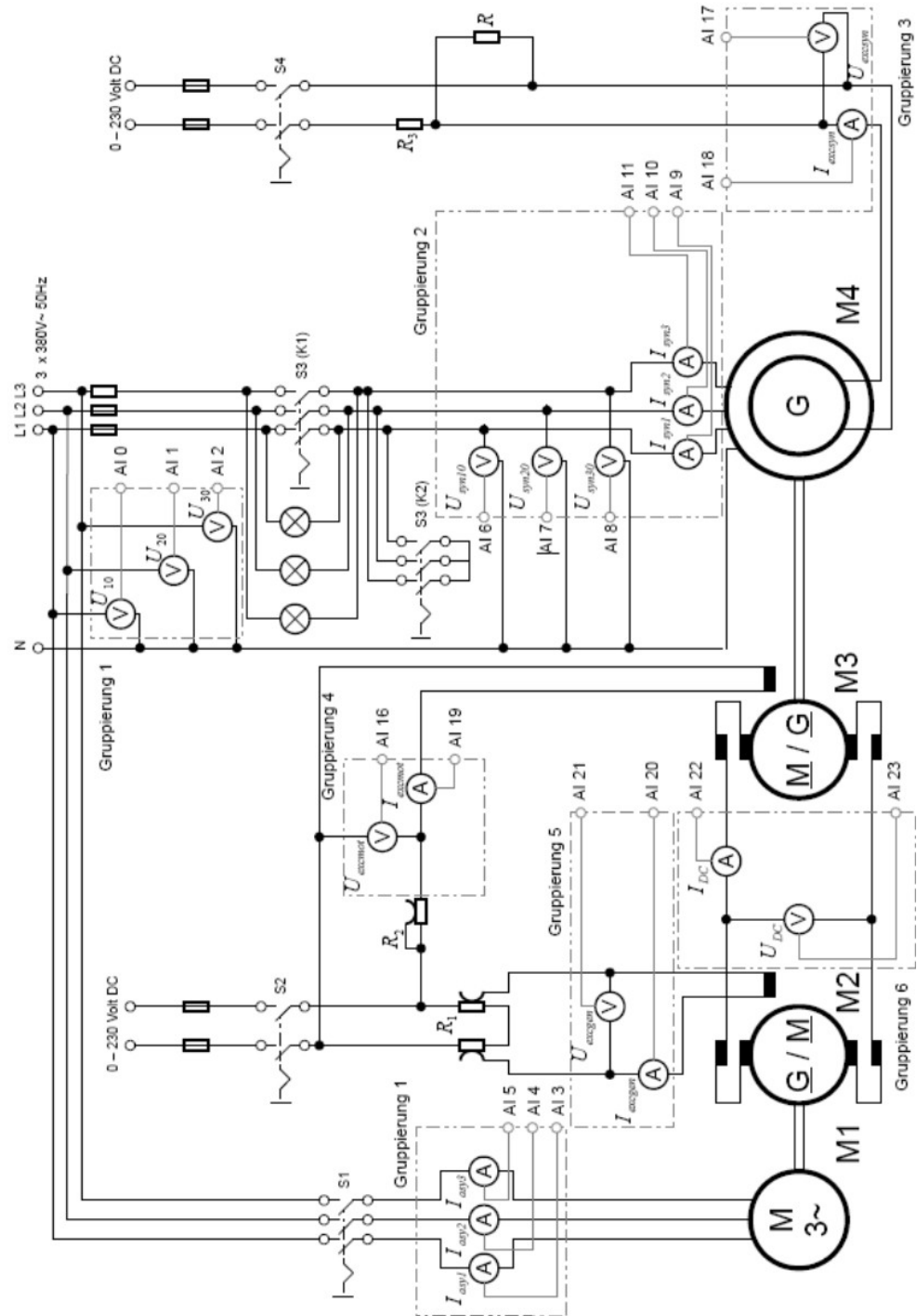


Abbildung 2.3: Messschaltung bzw. Hauptstromkreislaufplan der Messeinrichtung für Messdatenerfassung

## 2 Konzept des Gesamtsystems

### 2.4 Struktur der Elektrischen Messeinrichtung (Soll Zustand)

Durch die Gliederung der Elektrischen Messeinrichtung für den Hauptstromkreislaufplan (Soll Zustand) angenähert aus der VDE/VDI 2600, ist eine übersichtlichere Darstellung der Hardware zu vermitteln (s. Abbildung 2.4). Allgemein stellt die Messgröße  $X$ , die Messgrößen und das Messsignal  $Y$  die BNC-Kanäle der Tabelle 2.1 dar. Das Messsignal  $Y$  wird mittels BNC-Stecker auf BNC-Stecker Koaxialleitung an den jeweiligen BNC-Kupplungen des BNC2111-Anschlussblock für AC oder DC angeschlossen. Dieser ist mit dem Datenkabel NI SHC68 an die Netzwerkkarte PCI-6259 (A/D-Wandler Karte) angeschlossen. Der PCI-6259 ist in das PC-Gehäuse am PCI Slot des Motherboards verbunden. Dadurch hat LabView Zugriffe auf die Messdaten und kann diese verarbeiten. Die neuen generierten Messdatenerfassungen können entweder in bestimmten Metadaten und Formate abgespeichert werden. LabView soll auch über das PC-Gehäuse verbunden mit einem VGA-Slot an das Monitor, die Messwerte ausgeben.

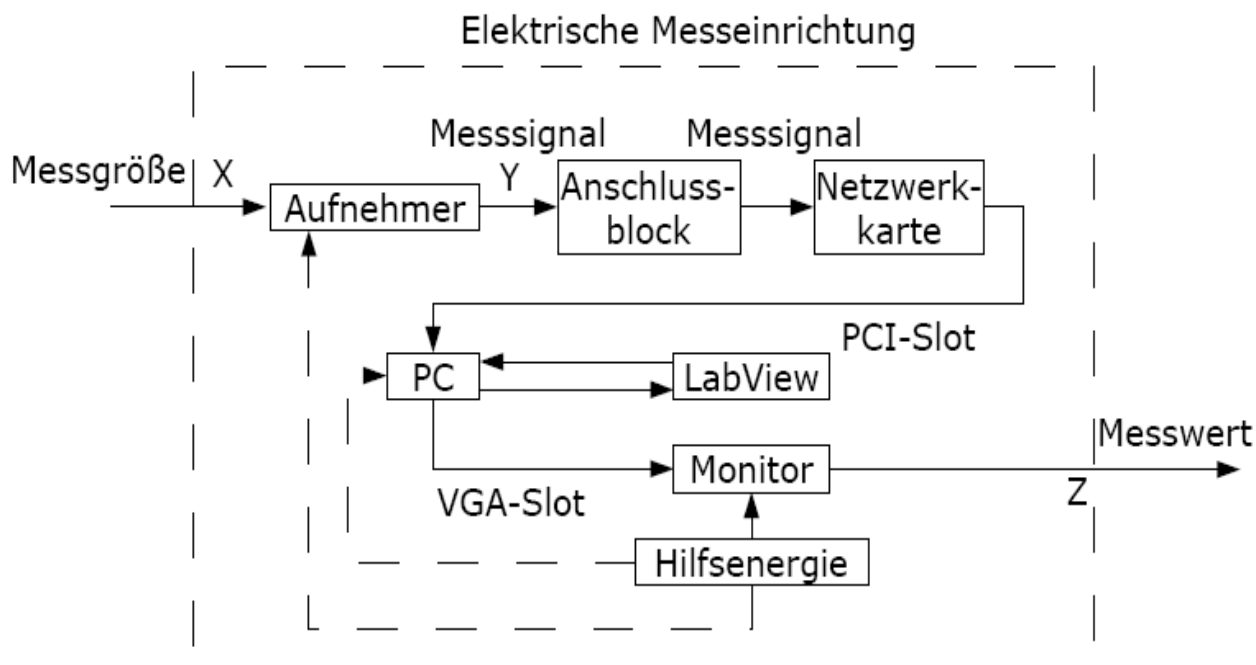


Abbildung 2.4: Struktur der Elektrischen Messeinrichtung des Hauptstromkreislaufplan (Soll Zustand)

Das PC-Gehäuse und der Monitor erhalten über Kaltgerätestecker ausgehend von einem Schutzkontakt Stecker ihre Hilfsenergie.

### 2.5 Rahmenbedingungen für die Aufnehmer der Messgrößen

#### 2.5.1 Räumliche Aufteilung der Gruppierungen

Die Gruppierungen 1, 2 und 3 bis 6 sind räumlich aufzuteilen, d.h. es sind 3 Gehäuse hierfür vorgesehen. Dadurch werden Störsignale durch die Gruppierungen 1 oder 2 verhindert. Auch führt eine räumliche Aufteilung zu einer besseren mobilen Aufstellung der Gehäuse. Das heißt, dass die Aufnehmer der Messgrößen auch nahe dem Motorklemmkasten der jeweiligen elektrischen Maschinen positioniert werden könnten.

## 2 Konzept des Gesamtsystems

### 2.5.2 Das Messsignal zu der Netzwerkkarte

Das Messsignal Y (s. Abbildung 2.4) ist durch die Rahmenbedingungen der Leistungskenndaten einer Multifunktions-Datenerfassungskarte (Netzwerkkarte) nach Tabelle 2.2 bestimmt.

Typ/Hersteller	NI PCI-6259 National Instruments
Single ended (Anzahl Analogeingänge)	32
Differentiell (Anzahl Analogeingänge)	16
Auflösung des ADC	16 Bit
Summen-Abtastrate (mehrere Kanäle)	1 MS/s
$U_{in}$	$\pm 0,1V$ bis $\pm 10V$
Digitale Input/Output Kanäle	32

*Tabelle 2.2 Leistungskenndaten der Analog/Digital Wandler-Karte*

Der Begriff Single-ended bedeutet das alle Messsignale zu einer Bezugsmasse als Referenzspannung ausgewertet werden. Hingegen differentiell die Differenz (nicht als Betrag) zweier Analogeingänge bildet. Ausgehend des Unterkapitels 2.2 sind 20 Analoge- oder Digitaleingänge an der Netzwerkkarte erforderlich. Bei Verwendung der Digitaleingänge mit dem Messsignal Y (Abbildung 2.4), überwiegen die Fehlergrößen gegenüber der Analogeingänge. Auch soll das Messsignal Y unverändert und direkt an die Netzwerkkarte übergeben werden.  $U_{in}$  ist der zulässige maximale bzw. minimale Amplitudenwert für die Analogeingänge.

#### 2.5.2.1 Summen-Abtastrate

Die Summen-Abtastrate 1MS/s, gilt bei mehr als einem zeitlichen parallel genutzten AI-Kanal des Anschlussblocks BNC-2111 durch die Netzwerkkarte. Dieses ist am Beispiel der Tabelle 2.1 und dem Elektrotechnischen Schaltplan Abbildung 2.3 zu beobachten, denn die Netzspannungen sind in einem ständigem Messprozess.

Die Abtastrate von 1MS/s unterliegt dem Shannonsche Abtasttheorem (auch als Nyquist-Kriterium bezeichnet). Somit ist nach Gl.(2.4) die Abtastfrequenz 1MHz (entspricht 1MS/s)  $f_B$  doppelt so groß wie die abzutastende Frequenz  $f_{max}$  [3]. Hierfür nun die genannte Gleichung mit

$$f_B = 2 \cdot f_{max} \quad (2.4)$$



## 2 Konzept des Gesamtsystems

---

LabView hingegen beschreibt die zulässige abzutastende Frequenz  $f_{\max}$  mit der folgenden Gleichung

$$f_B = 10 \cdot f_{\max} \quad . \quad (2.5)$$

Damit gilt die Ungleichung

$$f_{\max} < 100\text{KHz} \quad . \quad (2.6)$$

Bei Verletzung dieser oberen Grenzfrequenz, erstellt LabView eine fehlerhafte Messung.

### 2.5.2.2 Auflösung des ADC

Ein ADC kann Spannungen nur in bestimmten diskreten Stufungen der wahrgenommene Spannung wiedergeben. Dies sind die Quantisierungsintervalle. Das heißt der zu messende Bereich wird quantisiert (in diskrete Bereiche aufgeteilt). Hiermit ergibt sich ein Quantisierungsfehler, der eine Abweichung der wahren Spannung zu den ADC gemessene Spannung vorweist.

Die kleinste Quantisierungsspannung  $U_{\text{LSB}}$  (Least-Significant-Bit) ist das Quotient aus der Spannung  $U_{\text{in}}$  durch den Dualzahlen wert von  $2^n$ . Hierbei ist die Variable  $n$  die maximal zur Verfügung stehende Bit-zahl. Das hier erklärte legt nun die Gleichung

$$U_{\text{LSB}} = \frac{U_{\text{in}}}{2^n} \quad (2.7)$$

dar. Somit ergibt sich für die Berechnung der Quantisierungsstufen  $N$  folgende Gleichung

$$\Delta N = \frac{\Delta U_{\text{in}}}{U_{\text{LSB}}} \quad . \quad (2.8)$$

Da  $\Delta N$  keine ganze Zahl ist (bis auf die wenigen Ausnahmen) ist sie an dieser Stelle aufzurunden, bis  $N$  ein Element ganzer Zahlen ist.

Die Genauigkeit ist in Abhängigkeit der Auflösung und wird mit der Gleichung

$$\text{Genauigkeit} = \frac{1}{2^n} \cdot 100 \quad \% \quad (2.9)$$

berechnet. Aus der Gl.(2.7) und der maximalen Bit Anzahl von  $n$  gleich 16 (s. Tabelle 4.2), folgt für

$$U_{\text{LSB}} = 152,587 \mu\text{V} \quad . \quad (2.10)$$

der kleinste Spannungswert.

Damit ist mit der Tabelle 4.2 zu zeigen, das die Genauigkeit bei jedem weiterem Bit um  $\frac{1}{2}$  steigt.

## 2 Konzept des Gesamtsystems

### 2.5.3 Bestimmung der Frequenz-Bandbreite

Die Frequenz-Bandbreite  $f_B$  sollte innerhalb einer Aufzählung von Kriterien liegen:

- Nyquist-Kriterium Gl.(2.4), doppelt so groß wie die Betriebsfrequenz des messenden Signal einer Messgröße (s.Tabelle 2.1) sein.
- Mindestens 400. Harmonische erforderlich um den Oberschwingungsgehalt (Klirrfaktor) zu erfassen
- Die untere Frequenz sollte unterhalb der 49,2 Hz EU zulässige Abweichung für ein liegen 50Hz-Netz.

Nach diesen Kriterien ist mindestens ein

$$f_B \approx 50\text{KHz zu bestimmen.} \quad (2.11)$$

### 2.5.4 Konkretisierung der Galvanischen-Trennung

Die Galvanische Trennung ist eine Gegenmaßnahme der Erdschleifenbildung. Als Erdschleife werden Störkreise infolge der Mehrfacherdung bezeichnet siehe Abbildung 2.5. Zum Beispiel ist dies bei 50 Hz-Netz brummen als folge der Erdschleifenbildung zurückzuführen.

Diese entstehen aufgrund galvanischer und/oder induktive Kopplung [3].

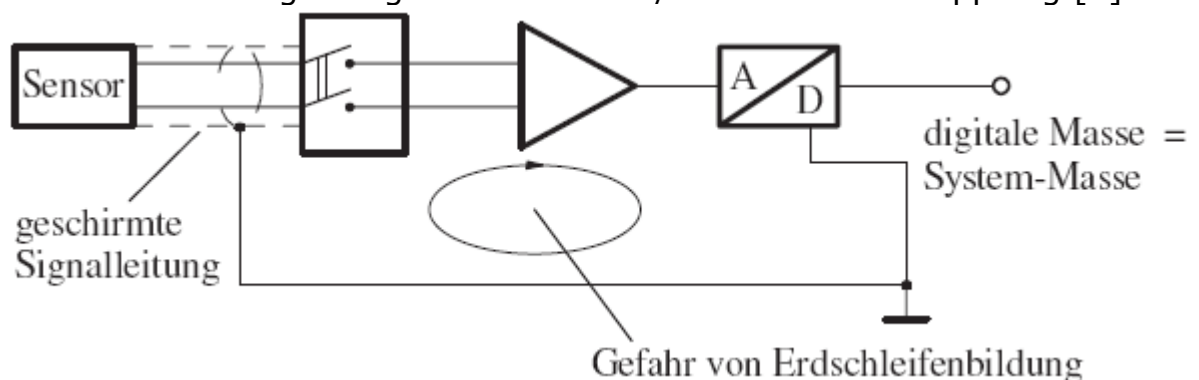


Abbildung 2.5: Erdschleifenbildung bzw. Massenschleifenbildung infolge Mehrfacherdung [3]

Weitere Gegenmaßnahme gegen Erdschleifen:

- Nicht verbundene Erdschleifen, d.h. einseitige Erdung.  
**Vorsicht:** Hiermit werden oft gültige Sicherheitsbestimmungen verletzt, die in jedem Fall zu verhindern sind!
- Trenntransformator zwischen den Signalleitungen einbauen.  
**Achtung:** Bei zu hoher Frequenz kann wegen den vorhandenen Streukapazitäten ein Kurzschluss erwirkt werden. Somit verliert es seine Wirkung als Gegenmaßnahme.
- Potentialtrennung durch Optokoppler.
- 

Zusätzlich ist die Netzwerkkarte durch die Galvanische-Trennung auch vor

## 2 Konzept des Gesamtsystems

einem Kurzschluss oder hohen Spannung geschützt. Dies gilt nicht bei einem Trenntransformator, da dieser dem Übersetzungsverhältnis Prinzip folgt. Diese Gegenmaßnahmen verhindern nicht die Gleichtaktstörungen (common mode noise voltage) oder die Gegentaktstörungen (differential mode noise voltage).

### 2.5.5 Bestimmung der Hilfsenergie

Hilfsenergie sind für die Aufnehmer der Messgrößen erforderlich, wenn es sich nicht um Aufnehmer nach dem Messwandler Prinzip handelt [3]. Es gibt zwei verschiedene Energieversorgungen für die Betriebsspannungen der Aufnehmer. Der klassische Trenntransformator (mit sekundär seitigem Gleichrichter, Stützkondensatoren und Linear Regelung) und kommerzielle Schaltnetzteil. Damit die Entscheidung der Hilfsenergie beschlossen werden kann, sind die Vor- und Nachteile der jeweiligen Netzteile aufzulisten.

Hilfsenergie	Vorteile	Nachteile
Kommerzieller Schaltnetzteil	Neuster Stand der Technik Vergleichbar geringes Gewicht geringer Kupferverbrauch Hohe Effizienz Vergleichbar Preiswerter als der Klassische Trenntransformator	Elektromagnetische Störquelle Parasitärer Effekt kann bei geringer Last entstehen
Klassischer Trenntransformator mit Sekundär seitige Linear Regelung	Einfacher und robuster Aufbau	Vergleichsweise geringe Effizienz Wärmeverluste Hohes Gewicht Hoher Rohstoff-verbrauch (Kupfer und Eisen) gegenüber Schaltnetzteilen

*Tabelle 2.3 Vergleich der Hilfsenergie*

Hierbei hat das kommerzielle Schaltnetzteil (SNT) überwiegende Vorteile und ebenso geringe Nachteile gegenüber dem klassischen Trenntransformator mit sekundär-seitiger Linear Regelung (s. Tabelle 2.3). Besonders der Vorteil des vergleichbar preiswerteren und der neuster Stand der Technik für das SNT gegenüber dem klassischen Trenntransformator ist ausschlaggebend. Kenndaten

## 3 Auswahl der Messverfahren

### 3 Auswahl der Messverfahren

Für die Auswahl der Messverfahren ist der Messvorgang zu erklären. Damit ist die Erklärung der Physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Effekt nicht erforderlich. Diese werden durch die Festlegung der Strom- und Spannungsmessung als Vorteil-Nachteil tabellarisch aufgefasst. Die Eigenschaften sind teilweise zu bewerten und abschließend aufgrund dieser für das jeweilige Messverfahren zu entscheiden.

#### 3.1 Die Strommessung

##### 3.1.1 Der Shunt

Nach Abbildung 3.1 bildet die Spannungsquelle  $U$  mit dem Widerstand  $R$  und Shuntwiderstand  $R_{Shunt}$  einen Stromkreis. Dieser enthält den fließenden Strom  $I$ , der Proportional zu der Spannung  $U_{Shunt}$  nach den Ohmschen Gesetz an dem Shuntwiderstand abfällt.

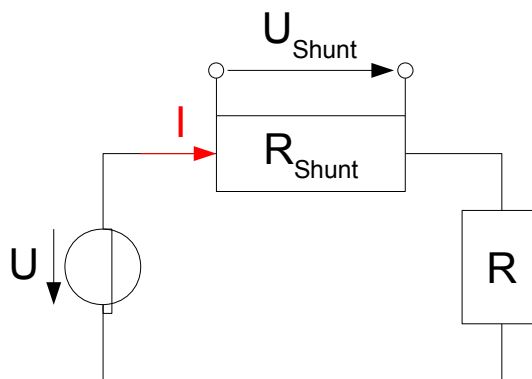


Abbildung 3.1: Einfacher Stromkreis mit einen Shuntwiderstand zur Messung von Strom

##### 3.1.2 Die Hallsensor

Zur Erläuterung der Hallsonde ist die Abbildung 3.2 eines einfachen Stromkreises mit der Stromstärke  $I$  erforderlich. Damit ist die Beziehung des Durchflutungsgesetz eines Leiters und Halleffekts einer Hallsonde, beim variieren der Stromquelle  $I$  zu beobachten.

### 3 Auswahl der Messverfahren

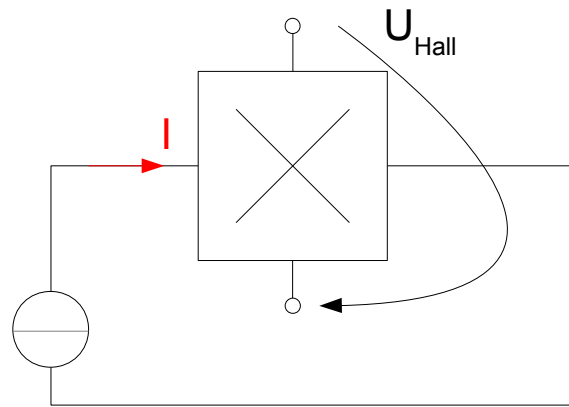


Abbildung 3.2: Einfacher Stromkreis mit einer Hallsonde zur Messung von Strom

#### 3.1.3 Festlegung der Strommessung

Die Festlegung der Strommessung ist mittels einer tabellarisch Vorteil-Nachteil Kriterium anzugehen.

Strom-Messverfahren	Vorteil	Nachteil
Shunt	Robuster Aufbau keine Hilfsenergie	Geringe Messspannung Hohe Leistungsverluste ( $I^2 \cdot R$ ) Hohe Rückwirkung zum Messsignal keine Galvanische-Trennung Gegentaktstörungen bei DC
Hallsonde	Galvanisch-Trennung geringe Leistungsverluste geringer Platzbedarf Bipolar Dämpfung der Gleichtaktstörungen	Hilfsenergie erforderlich Null-Offset aufgrund natürlicher Erdmagnetfeld

Tabelle 3.1 Pro-Contra des Shunt gegenüber der Hallsonde

Diese Tabelle zeigt das die Positiven Kriterien bei der Hallsonde und die negativen Kriterien bei dem Shunt überwiegen. Besonders bei dem Shunt mit hohem Leistungsverlust und keiner Galvanischen-Trennung (erforderlich s. 2.5.4), ein Argument für die Auswahl der Hallsonde.

## 3 Auswahl der Messverfahren

### 3.2 Die Spannungsmessung

#### 3.2.1 Der Übertrager

Der Übertrager kann zur Messbereichsanpassung an die geforderten Messbereiche bei Wechselstrom- und Wechselspannungsmessungen anstelle von Widerstandsnetzwerken auch eingesetzt werden. Dabei entstehen geringe thermische Verluste im Anpassungsnetzwerk und somit eine schwache Rückwirkung auf das zu Messendesignal. Ein weiterer Vorteil ist die Potenzialtrennung, die vor allem bei Hochspannungsanlagen ein großer Sicherheitsgewinn ist. Im Bereich der Messtechnik kann sehr häufig das Ersatzschaltbild eines idealen Übertrager genutzt werden.

##### 3.2.1.1 Allgemeiner Übertrager

Die Abbildung 3.3 stellt den Allgemeinen Übertrager dar. Bestehend aus 2 Spulen mit den Windungszahl  $w_1$  und  $w_2$ , die meist über einen Eisen- oder Ferritkern gekoppelt sind.

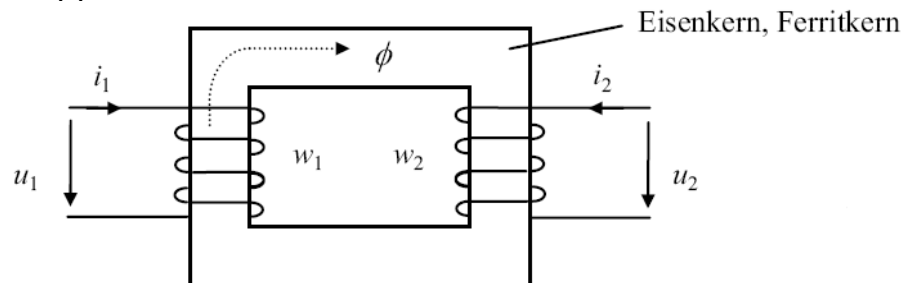


Abbildung 3.3: Prinzipieller Aufbau eines Übertrages [4]

Die Physikalische Mechanismen die zu Verlusten führen bzw. einem nicht idealem Verhalten sind

- Kupferverluste der Wicklungen (Ohmschen Widerstand der Spule),
- Streufelder außerhalb des Kerns (nicht ideale Kopplung),
- Eisenverluste im Kern (induzierte Wirbelströme)
- und Magnetisierungsstrom  $\Phi$  (Erzeugung des Magnetfeldes).

Im Allgemeinen Transformator-Ersatzschaltbild sind die hier gerade aufgezählten Verluste und Effekte, durch ohmsche Widerstände, Streuinduktivitäten und Hauptinduktivitäten berücksichtigt.

#### 3.2.2 Der Optokoppler

Ein Optokoppler besteht aus einem LED als Lichtsender und einem Fotodetektor (Fotodiode, Fototransistor, Fotothyristor) als Lichtempfänger in einem Gehäuse (s. Abbildung 3.4). Diese sind mit einem Transparenten Kunststoff gekoppelt, also eine optische Kopplung, dennoch ist der Sender und Empfänger nicht elektrisch miteinander verbunden. Damit die optische Kopplung einen hohen Wirkungsgrad erreicht, ist ein undurchsichtiges Kunststoffgehäuse (oder in Sonderfällen Metallgehäuse) erforderlich. Somit ermöglicht ein Optokoppler eine Signalübertragung zwischen Stromkreisen, die voneinander galvanisch getrennt sind.

### 3 Auswahl der Messverfahren

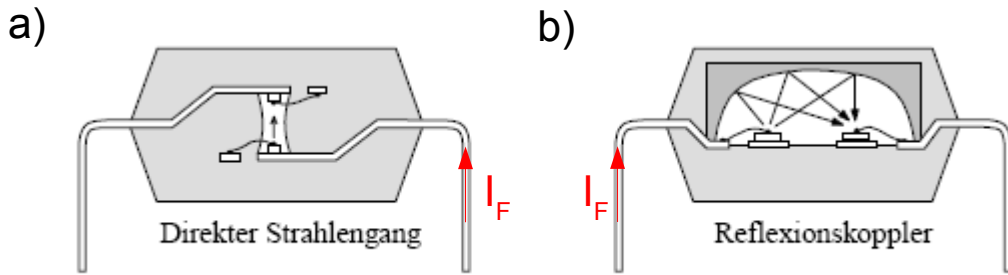


Abbildung 3.4: Aufbau des Optokopplers mit dem LED-Durchlaßstrom  $I_F$  [5]

Nach Abbildung 4.22 a) ist für den Stromkreis mit unbekanntem Innenwiderstand der Spannungsquelle  $U$  ein Vorwiderstand  $R_V$  als Strombegrenzer zu bestimmen. Es gilt also

$$R_V = \frac{U - U_F}{I_F} \quad (3.1)$$

Damit erhöht sich die Lebensdauer und es entstehen keine Ausfälle bei den LEDs (LED: **l**ight-**e**mitting-**d**iode) der Optokoppler. An den Klemmen A 1 (A: Anode) und K 2 (K: Kathode) weist die Spannung  $U_F$  ein nicht lineares Verhalten auf. Die Lichtstärke  $I$  hat ein proportionales Verhalten zu der Stromstärke  $I_F$  (s. Abbildung 4.22 b)) und sendet Lichtimpulse als Signale und Daten zu dem Fototransistor. Diese treffen an der Basis und in Abhängigkeit der Lichtstärke beugt sich die Ausgangsspannung  $U_{CE}$  an den Klemmen 3 C (C: Collector) und 4 E (E: Emitter). Somit besteht ein Koppelfaktor (CTR: **C**urrent-**t**ransfer-**r**atio) das auch als Stromübertragungsfaktor genannt wird, zwischen Eingangssignal und Ausgangssignal. Es gilt also

$$CTR = \frac{I_C}{I_F} \text{ in \%}. \quad (3.2)$$

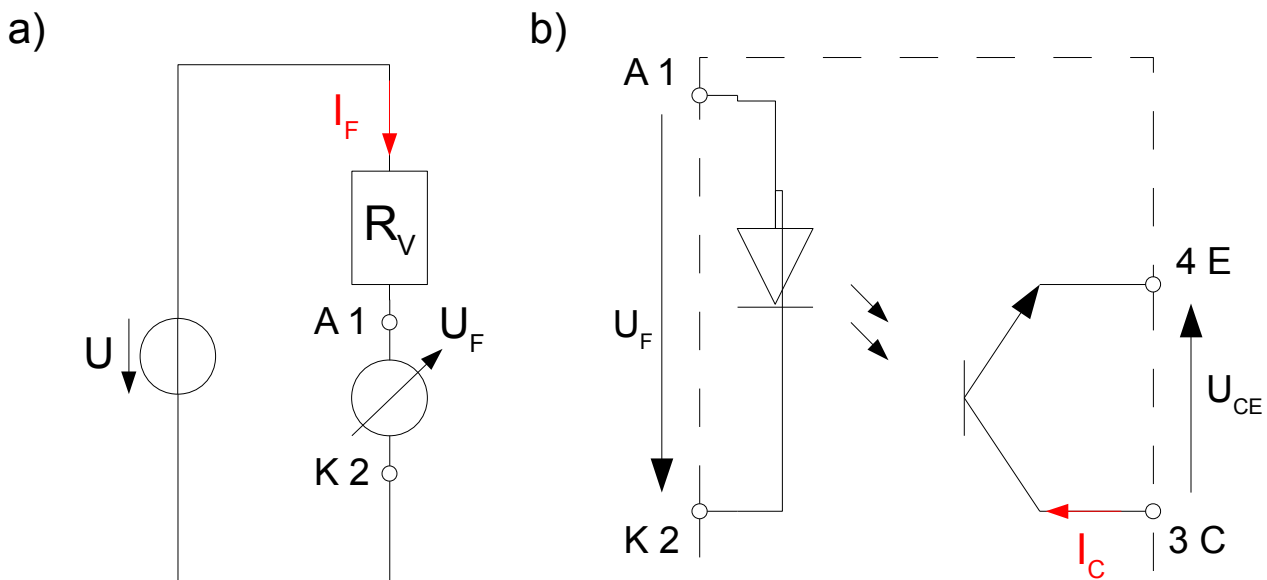


Abbildung 3.5: Zur Erläuterung des Optokopplers ist **a)** links Einfacher Stromkreis mit dem Vorwiderstand, Widerstand  $R$  und den Messpunkt 1-2 für einen Optokoppler. **b)** Rechts ist die Schaltung des Optokopplers für die LED-Fototransistor Ausführung dargestellt mit den jeweiligen Strom- und Spannungsgrößen und dem Basisfaktor  $B$  dargestellt.

### 3 Auswahl der Messverfahren

#### 3.2.3 Festlegung der Spannungsmessung

Die Festlegung der Spannungsmessung ist mittels einer tabellarisch Vorteil-Nachteil Kriterium anzugehen.

Spannungs-Messverfahren	Vorteil	Nachteil
Übertrager	Robuster Aufbau Galvanische-Trennung Keine Hilfsenergie	Keine Gleichspannungsmessung Leistungsverluste (Kupfer) Vergleichbar hohes Gewicht und Platzbedarf zu dem Optokoppler Untergrenzfrequenz
Optokoppler	Hohe Isolationsspannung Echt elektrische Potenzialtrennung von Eingangssignal zu dem Ausgangssignal Digitale und analoge Signalübertragung Geringe Koppelkapazität Dämpfung der Gegentaktstörung bei DC Bipolar möglich mit Triac oder PhotoMos Geringe Rückwirkung	Hilfsenergie erforderlich LED Lebenszeit

*Tabelle 3.2 Pro-Contra des Übertrager gegenüber dem Optokoppler*

Diese Tabelle zeigt das die Positiven Kriterien bei dem Optokoppler und die negativen Kriterien bei dem Übertrager überwiegen. Besonders bei dem Optokoppler mit Bipolar Möglichkeiten und hohe Isolationsspannung, ein Argument für die Auswahl des Optokopplers.



### 4 Entwicklung der Messumformer

#### 4.1 Platinenoberfläche und Anwendungssoftware

Die Platinenoberfläche unterliegt den untenstehenden Kriterien:

- Hohe Isolationsspannung
- Breite Leiterbahnen für hohe Ströme
- Große Leiterbahnabstände für hohe Spannungen
- Leiterbahnform veränderbar um eine Ideal und symmetrische Schaltung herzustellen
- Hochfrequenz geeignete Leiterplatte

Damit erfüllt der FR4-Standard PCB-Leiterplatte (PCB: **p**rinted **c**ircuit **b**oard) die aufgezählten Kriterien.

Für die Erstellung einer PCB-Platine ist eine frei erhältliche kostenlose Anwendungssoftware erforderlich mit folgenden Kriterien

- Elektronische Schematische Zeichnung, die auch nachträglich ediert werden kann
- ERC (ERC: **E**lectrical-**R**ules-**C**heck) für Verbindungskontakte
- BOM (BOM: **B**ill **o**f **M**aterials) eine Stückliste und/oder Querbezüge erstellen für den Einkauf
- Einfache und nachträgliche modifizierbare Footprint Zuweisung
- Zugängliche Bibliothek mit Dateipfad
- Ein Platinen Layout mit direkter Bearbeitung im Footprint Editor
- Design Rule mit DRC (DRC: **D**esign-**R**ule-**C**heck) Prüfung
- Gerber (.bak), Bohr (.drl) und Board (.brd) Dateiformat Erstellung

Ausgehend aus diesen Kriterien ist KiCad und nicht das kostenpflichtige Eagle Anwendungssoftware verwenden worden.

#### 4.2 Auswahl der Sensoren

Nach diesen folgenden aufgezählten Kriterien sind die Sensoren bei den Distributoren Farnell, DigiKey und Mouser im Internet zu suchen:

- DIP8 Gehäuseform (mittels eines Adapter Sockels einsetzen,) für die Optokoppler und Operationsverstärker, damit diese bei Beschädigung ersetzt werden können.
- Wenn möglich SMD Gehäuseform für die Hallsensoren, dieses ist für die SMD-Padfläche für die Abkühlung durch Stromstärke entstehende Temperatur erforderlich.
- Die Messbereiche der Optokoppler und Hallsensoren, haben die der Messgrößentabelle (s. Tabelle 2.1) zu erreichen bzw. ist ein Spannungsteiler erforderlich.
- Die Sensoren sind mit den Eigenschaften Bipolarität und AC/DC nach den Unterkapiteln 3.1.3 und 3.2.3 festgelegt

## 4 Entwicklung der Messumformer

- Die geforderten Kriterien nach Kapitel 2.5 sind in ihrer Mindest-Vorgaben umzusetzen
- Einheitliche Versorgungsspannung ist für die PCB-Platine und ihre Massenfläche umzusetzen, damit entstehen geringere Referenzspannung Abweichungen.

Es sind die Hersteller Allegro Microsystems, Tamura Corporation und Avago Technologies bei den Suchergebnissen aus dem Internet Webpage der Distributoren Farnell, DigiKey und Mouser ausgegeben worden. Hierbei sind höchstens zwei Sensoren zur näheren Auswahl aufzuführen. Diese kann man anhand der zur Verfügung stehende Datenblätter, der jeweiligen Hersteller ausschlaggebend durch ein Fazit bestimmen. Damit wird die Marktanalyse konkretisiert, durch den eventuellen Ausfall eines Sensors bzw. Sonde.

### 4.2.1 Optokoppler-Sensoren von Avago

#### 4.2.1.1 HCNR-200

Das HCNR-200 ist ein Hoch linearer Optokoppler in DIP8 Gehäuseform und ist dem IL-300 von Siemens ähnlich. Ausgehend der Abbildung 4.1 handelt es sich um eine optoelektronisch Übertragung nach

Abbildung 3.4 b), d.h. es ist ein Reflexionskoppler. Das Applicationnote Monitor motor supply voltage (s. Anhang 1.5.1), besagt das man mit diesem die Versorgungsspannung eines elektrischen Motors überwachen kann. Die Figure 18. Bipolar isolation amplifier (s. Anhang 1.5.2) erfüllt die vorgegebenen Kriterien, mit zwei Optokopplern und 3 Operationsverstärker mit  $\pm 15V$

Versorgungsspannung. Dieses hat keine nähere Messbereichs Definition für das Eingangssignal  $V_{IN}$ . Hierfür ist ein Spicemodel Quellcode (s. Anhang 1.5.3) für LTSpice aufgeführt, denn dieses wird benötigt um die Anpassung der passiven Bauelemente zu simulieren.

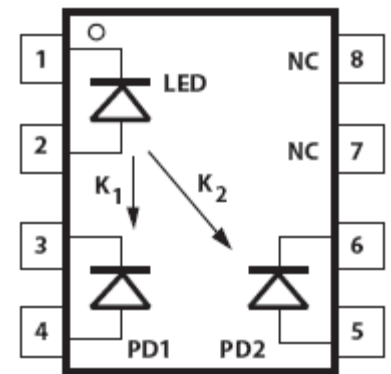


Abbildung 4.1: Functional diagram HCNR-200

#### 4.2.1.2 HCPL-7840

Der Trennverstärker (wird auch Isolationsverstärker genannt) HCPL-7840 hat ein sigma delta ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) analog-to-digital converter (s.[3]) mit Chopper Technologie (s.[3]) stabilisierten

Operationsverstärker und optoelektronisch Übertragung im DIP8 Gehäuseform. Dieses Übertragungsverfahren und der Abbildung 4.2 führen zu der Annahme der optoelektronisch Übertragung aus der Abbildung 3.4 a), d.h. direkt Strahlengang ist.

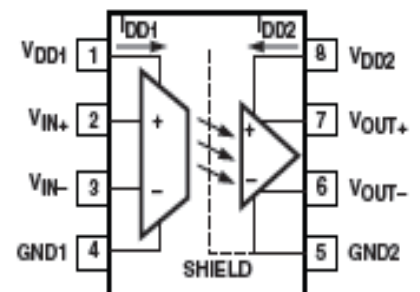


Abbildung 4.2: Functional diagram HCPL-7840

## 4 Entwicklung der Messumformer

Ausgehend der Applicationnote General purpose analog signal isolation, kann es für eine allgemeine echt elektrische Potenzialtrennung analoge Signal Übertragung angewendet werden (s. Anhang 1.4). Für den Messbereich ist das Eingangssignal mit einem Maximalen Spannungsamplitudenwert von  $\pm 200\text{mV}$  (Genauigkeit und Linear) anzunehmen. Note 1 erläutert die Verbindung von PIN 3 ( $V_{-IN}$ ) mit PIN 4 (GND1) siehe Abbildung 4.2 für den Messbereich  $\pm 200\text{mV}$ . Die Figure 9 zeigt das Bipolare Verhältnis mit einem Diagramm Output voltage vs. Input voltage. Figure 18 gibt die Empfehlung für ein elektronisch schematischen Schaltung vor. Dieses sind ein Trennverstärker +5V für  $V_{DD1}$  und  $V_{DD2}$  und einem Operationsverstärker (mit Differenzverstärkerschaltung für eine Single-Ended Bezugsspannung) mit  $\pm 15\text{V}$  Versorgungsspannung das verändert werden kann (s. Anhang 1.4 und Unterkapitel 4.4).

### 4.2.2 Hallsensoren von Allegro und Tamura

Die Hallsonde Serie der jeweiligen Hersteller sind mit jeweils \*\*\* (s. Anhang 1.3) Bezeichnungen beschrieben. Damit sind alle die jene Messbereich Eingangssignale aus den Produktions Artikeln erfasst.

#### 4.2.2.1 L18P\*\*\*12 Serie

Es sind drei Hallsensoren (s. Anhang 1.3) für die erforderlichen Kriterien festgestellt worden.

Die Electrical Performances Input current vs. Output current für  $25^\circ\text{C}$ , zeigt ein Wechselsignal mit offset zwischen 0 bis +5V. Nach der Electrical connection diagram ist der Lastwiderstand  $R_L$  zwischen PIN 4 und GND zu legen. An dieser Stelle ist dann auch die Ausgangsspannung  $V_{OUT}$  abzugreifen. Die Versorgungsspannung  $V_{CC}$  benötigt +12V (s. Abbildung 4.3).

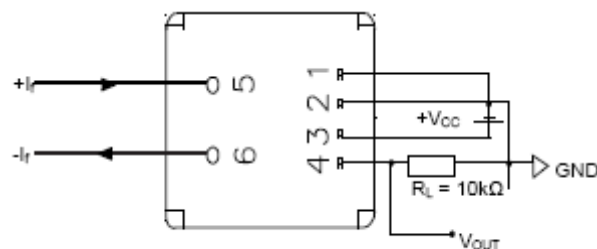


Abbildung 4.3: Typical Application L18P\*\*\*12

#### 4.2.2.2 ACS756\*\*\* bzw. ACS712\*\*\* Serie

Es sind zwei Hallsensoren (s. Anhang 1.2) aus der ACS712\*\*\* Serie und einer aus der ACS756\*\*\* Serie (s. Anhang 1.1) nach den erforderlich Kriterien festgestellt worden.

Die Characteristic Performance mit Output Voltage vs. Sensed Current bestehe für alle hier noch aufgeführten Hallsonde der Allegro Microsystems. Dieses Diagramm zeigt ein Wechselsignal mit offset zwischen 0 bis +5V (s. Anhang 1.2).

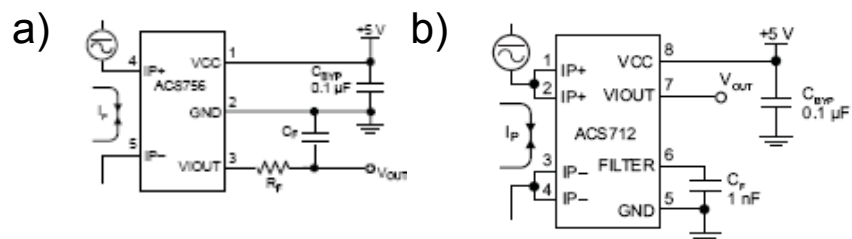


Abbildung 4.4: Typical Application mit a) ACS756- und b) ACS712-Serie

## 4 Entwicklung der Messumformer

---

Durch den Einsatz der Allegro Chopper Technologie, sind geringe Abweichungen bei Temperatur Änderungen erläutert (s.Anhang 1.2 und 1.1). Der Absolute Fehler (Total Output Error) beträgt bei 25°C, 0,8% für die ACS756-Serie Daraufhin bei der ACS712-Serie beträgt es für 25°C einen Total Output Error von 1,5%. Die Versorgungsspannung  $V_{CC}$  beider Serien benötigt +5V. Für den Erhalt der Frequenzbandbreite der ACS712-Serie, ist ein 1nF zwischen den PIN 5 und 6 anzusetzen (s.Abbildung 4.4 b)). Die Ausgangsfrequenz Filterung der Serie ACS756-Serie ist mit  $R_F$  und  $C_F$  noch zu bestimmen (s.Abbildung 4.4 a)).

### 4.2.3 Fazit der Sensoren Auswahl

Die Figure 18 des Trennverstärkers HCPL-7840, ist gegenüber dem Hochlinearen Optokoppler HCNR-200 mit weniger Aktive bzw. Passive Bauelemente umzusetzen. Somit ist ein Spannungsteiler für die jeweiligen Messgrößen Spannungswerte, auf ein  $\pm 200\text{mV}$  Maximale Spannungsamplitudenwert herabzusetzen. Aufgrund des Kriterium der Einheitlichen Versorgungsspannung nach 4.2, sind die Hallsensoren Serie des Herstellers Allegro Microsystems zu nutzen.

### 4.3 Marktanalyse der Sensoren

Für die Marktanalyse sind ausgehend dem Unterkapitel 4.2.3, die jeweiligen Distributoren mit ihren Angeboten vorzustellen. Somit ist der Vergleich zwischen den Distributoren Farnell und DigiKey in Betracht zu ziehen.

- 12% Studentenrabatt (Farnell)
- ab 55€ (07.10.2013) Einkauf kostenloser Versand (Farnell)
- Kundennummer der Fachhochschule IWZ Köln Deutz vorhanden (Farnell)
- DigiKey keine Kundennummer der Fachhochschule IWZ Köln Deutz vorhanden
- Kostenloser Versand ab 65€ (07.10.2013)
- Rabatte in Abhängigkeit eines Artikels mit höherer Bestellmenge können vorhanden sein bei Farnell oder DigiKey Diese Angebote sind in einer tabellarischen Marktanalyse einzubinden.

Die Angebote sind zunächst für eine einmalige Bestellung, in einer tabellarischen Marktanalyse einzubinden. Damit ist dann eine Marktanalysen Diagramm zu erstellen, um gegebenenfalls einen Break-Even-Point zu beobachten. Somit kann die Annahme des Farnell Attraktiven Angebots mit 12%, auf höhere Bestellmengen von 1 bis 500 Stück geprüft werden. Diese ist der Erhalt des Angebots Attraktivität von 12%.

## 4 Entwicklung der Messumformer

Messgrößen	Messwert mit Sicherheitsfaktor	Hersteller / Typ	Messbereich	Frequenz-Bandbreite	Anzahl	Farnell	Digi-Key	Differenz
						Gesamt- bzw. Einzelpreis	Einzelpreis	Farnell – Digi-Key (Betrag)
$U_{10'}$ , $U_{20'}$ , $U_{30'}$ $U_{syn10'}$ , $U_{syn20'}$ $U_{syn30'}$ , $U_{excsyn'}$ $U_{excmt'}$ , $U_{excgen'}$ $U_{DC}$	$\pm 400$ V	Avago Technologies / HCPL-7840	$\pm 200$ mV	100 kHz	10	5,99 €	5,04 €	0,96 €
$I_{syn1'}$ , $I_{syn2'}$ , $I_{syn3'}$ $I_{asy1'}$ , $I_{asy2'}$ , $I_{asy3'}$ , $I_{DC}$	$\pm 37$ A - $\pm 50$ A	Allegro Microsystems / ACS756KCA-050B	$\pm 50$ A	120 kHz	7	7,52 €	5,31 €	2,21 €
$I_{excsmot}$	9,4 A	Allegro Microsystems / ACS712ELCTR-20A	$\pm 20$ A	50 kHz	1	4,14 €	3,47 €	0,67 €
$I_{excmt}$	0,71 A	Allegro Microsystems / ACS712ELCTR-05B	$\pm 5$ A	50 kHz	2	3,91 €	3,53 €	0,38 €
$I_{excgen}$	1,9 A							
Gesamtpreis (Brutto)						124,50 €	98,05 €	
Versandkosten (20 €)						-	-	
12 % Rabatt						109,56 €	-	
Gesamtpreis mit MwSt. 19% (Netto)						130,38 €	116,68 €	

Tabelle 4.1: Marktanalyse der Distributoren bei einmaliger Bestellung und Zuweisungen der Messgrößen und ihren Sensoren

Ausgehend aus der tabellarischen Berechnungen im Anhang 2, ist ein Liniendiagramm erstellt. Hierfür ist der Gesamtpreis (Brutto) ohne Mehrwertsteuer (MwSt.) berechnet worden, da dieser Proportional für den Netto Betrag berechnet werden kann. Somit führt es zu keinem Änderungsbeitrag des Gesamtpreises für die Marktanalyse.

### Marktanalyse der Distributoren

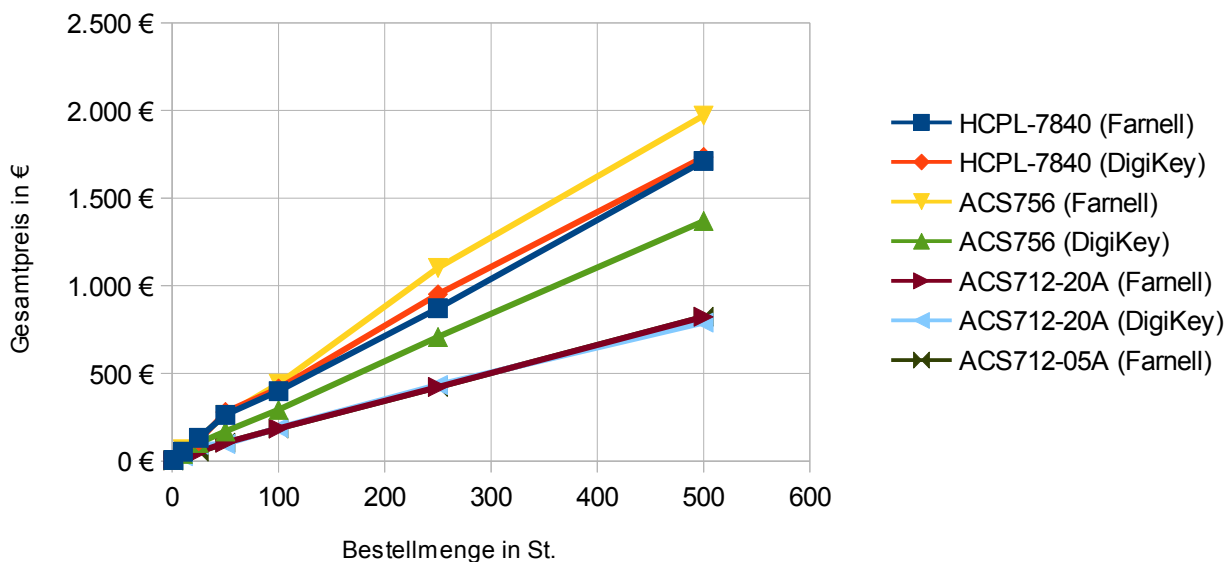


Abbildung 4.5: Farnell vs. DigiKey in Abhängigkeit der Sensoren (Marktanalyse höherer Bestellmenge), Datum 07.10.2013

## 4 Entwicklung der Messumformer

---

### 4.3.1 Fazit der Marktanalyse

Die Annahme des Break-Even-Point kann sich nach dem Diagramm Farnell vs. DigiKey (s. Abbildung 4.5) bei dem Trennverstärker HCPL-7840 Sensoren mit ab einer Bestellmenge von 500 St. bestätigen. Für die Hallsensoren der ACS712-Serie ist eine fast Lineares Verhältnis zu beobachten. Ausgehend der Abbildung 4.5 ist besonders die ACS756-Serie sehr weit von einem solchen Punkt entfernt. Dennoch aus der Berechnungstabelle ist eine Differenz von 93,81€ (also ca. 100€ für 50 St.) und 602,00€ bei einer Bestellmenge von 500 St. festgestellt worden. Dies entspricht schon einem Abfall von 64,17% des Gesamtpreis, d.h. es kann bei einer noch Höheren Bestellmenge zu einem tatsächlichen Break-Even-Point führen. Den Bedarf (, also Bestellmenge für die Abbildung 4.5) der ACS756-Serie könnte man auch anders umgehen, aber hierzu wird im Kapitel 6 noch näheres Erläutert.

### 4.4 Bestimmung der Messkanäle

Für die Messkanäle ist ein Blockdiagramm zur Übersichtlichkeit der Aktiven und Passiven Bauelemente darzustellen. Die Messgrößen (s. Tabelle 2.1) haben höhere Spannungswerte, als der Trennverstärker HCPL-7840 zwischen den PIN 2 und 3 mit  $\pm 200\text{mV}$  für genaue und lineare Übertragung (s. 4.2.1 Und Abbildung 3.2) es erlaubt. Daher ist ein Spannungsteiler zu berechnen und diesen dann durch gegebene Industrienormen zu bestimmen. Durch die Angaben der zu erwartenden Messsignale, ist ein Übertragungsfaktorbereich für den Effektivwert der Spannung zu berechnen. Diese werden dann mit den Messergebnissen und den daraus resultierende Übertragungsfaktoren aus dem Kapitel 5.2 verglichen und bewertet.

#### 4.4.1 Blockdiagramm der Messkanäle

Blockdiagramme sind für eine Vereinfachung und übersichtlichere Darstellung der Messkanäle geeignet. Dadurch sind Veränderungen, Ergänzungen oder nicht relevante Bereiche der Messkanäle einfacher umzusetzen. Hierbei ist die Richtung des Messkanals umgekehrt zu folgen (d.h. von dem Messsignal zu der Messgröße), damit der Spannungsteiler im nächsten Unterkapitel 4.4.2 berechnet und bestimmt werden kann.

Aufgrund der Kriterien für die Hilfsenergie aus den Unterkapiteln 2.5.5 und 4.2, ist eine Einheitliche Versorgungsspannung auf  $\pm 5\text{V}$  (s. 4.2.3) bestimmt worden. Somit verändert diese, die Differenzverstärkerschaltung der Abbildung 4.6 für eine  $\pm 15\text{V}$  Versorgungsspannung. Aus dem Datenblatt des Trennverstärkers HCPL-7840, ist der Operationsverstärker TLC277 für die Differenzverstärkerschaltung empfohlen. Daher ist dieser in allen Messkanälen für die Spannungsmessung einzuführen. Aus Sicherheitsgründen sind zwei verschiedenen Differenzverstärkerschaltungen mit OP1 (für die Gruppierungen 1 und 2) und OP2 (für die Gruppierungen 3 bis 6) zu verzeichnen. Dadurch wird eine Verwechslung (also Systematischer Fehler) der Wechselspannung (AC) mit der Gleichspannung (DC), bei ihren Effektivwerten verhindert.

Für die Bestimmungen der Blockelemente der Gruppierungen 1 und 2, wird immer auf den ersten Messkanal der Gruppierung 1 eingegangen. Denn Diese haben für den Strom und Spannungs-Messkanal, die gleichen Blockelemente (s. Abbildung 4.7 Und Abbildung 4.8).

## 4 Entwicklung der Messumformer

Damit die Blockelemente und ihre Schaltungen des Spannungs-Messkanal bestimmt werden können, ist die untenstehende Abbildung erforderlich.

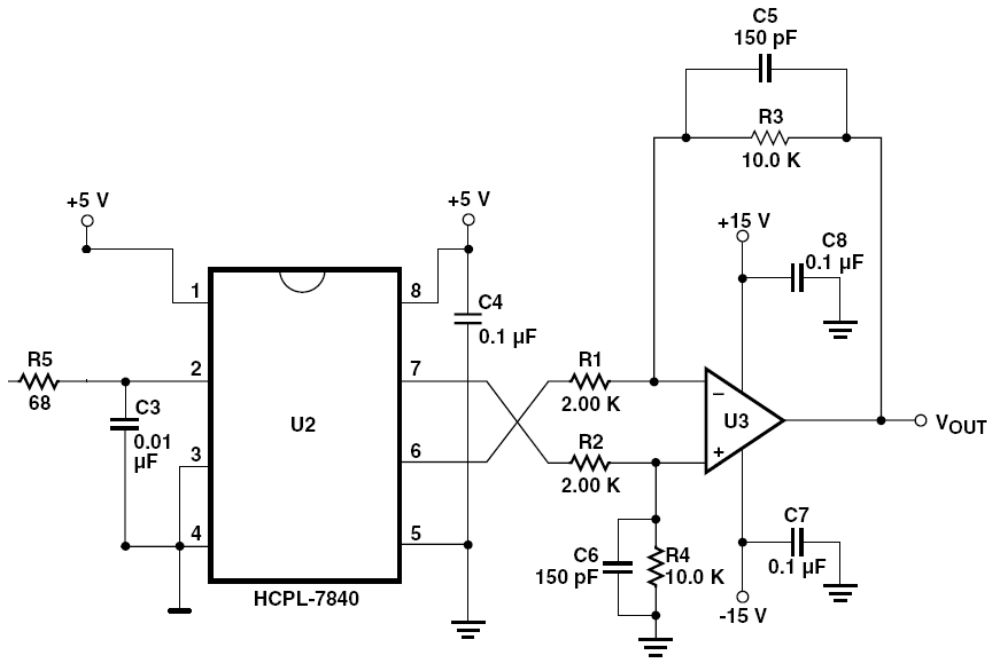


Abbildung 4.6: Figure 18 Empfohlene Schaltung aus dem Datenblatt bearbeitet

Bevor das ausgehende Messsignal (allg. Y nach Abbildung 2.4) des Spannungs-Messkanal den Anschlussblock erreicht, ist ein Tiefpass-filter TP2 (s. Abbildung 4.7, 4.8 und 4.9) mit  $f_B = 100\text{kHz}$  (Frequenzbandbreite des Trennverstärker) einzufügen. Dieser ist nicht im Datenblatt (s. Anhang 1.4) der empfohlenen Schaltung zu finden. Daher wird dieser durch die Grenzfrequenz Berechnung bestimmt mit der Gleichung

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (4.1)$$

Mit  $f_g$  entspricht gleich  $f_B$  ist die Grenzfrequenz auf 100kHz festgelegt. Der Widerstand R soll nach der E24 DIN Reihe einen Wert von 24Ω erhalten. Es gilt also für die Kapazität

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 24\Omega \cdot 100\text{kHz}} \quad (4.2)$$

ein berechneter Keramik-Kondensator Wert, der als ein 68nF vorhanden.

Für das Blockelement  $C_F$  (s. Abbildung 4.9 und die Typical Application 4.4 b) ) sind Keramik-Kondensatoren mit einem Wert von 1 nF (, nach dem Datenblatt der ACS71-Serie s. Anhang 1.2 ) einzubinden.

Der Tiefpass-filter TP3 (s. Abbildung 4.7, 4.8 und 4.9) ist nachdem Datenblatt des ACS756-50 (s. Anhang 1.1 ) mit dem Widerstand  $R_F$  und  $C_F$  (s. Abbildung 4.4a) und nicht zu verwechseln mit den Gruppierungen 3 bis 5 Kondensator) zu bestimmen. Diese sind mit den Werten für

$$R_F = 1,3\text{K}\Omega \quad \text{und} \quad C_F = 1\text{nF}$$

zu verwenden.

## 4 Entwicklung der Messumformer

---

Ausgehend der Figure 18 (s.Abbildung 4.6), ist die Differenzverstärker-Schaltung (OP1) mit Aktiven Tiefpass-filtern für  $\pm 5V$  Versorgungsspannung zu verändern. Hieraus ergibt dies

$$V_{OUT} \leq 3,4V \quad (4.3)$$

für eine Spannungsreserve und (Spannungsschnitt der Spannungsgröße  $V_{OUT}$  wird vorgebeugt) der nachfolgenden Ungleichung gilt

$$3,4V \geq \frac{R_3}{R_1} \cdot (V_{-OUT} - V_{+OUT}) \quad (\text{s.Abbildung 4.2}). \quad (4.4)$$

Somit sind die Widerstände  $R_1$  und  $R_3$  zu bestimmen mit der Ungleichung

$$\frac{3,4V}{V_{-OUT} - V_{+OUT}} \geq \frac{R_3}{R_1} \quad (4.5)$$

Aus dem Datenblatt des Trennverstärkers HCPL-7840 der Note 3 (s.Anhang 1.4), sind die Spannungsgrößen  $V_{-OUT}$  und  $V_{+OUT}$  mit der folgen Gleichung

$$U_{T,PEAK} \cdot 8 = (V_{+IN} - V_{-IN}) \cdot 8 = (V_{+OUT} - V_{-OUT}) \quad (4.6)$$

(s.Abbildung 4.2) definiert. Die Spannungsgrößen  $V_{-IN}$  und  $V_{+IN}$  sind bei einem Vollausschlag (Maximaler Spannungsamplitudenwert) für hohe Genauigkeit und Linearität mit einem  $\pm 200mV$  (s.4.2.3) zu erwarten. Damit ergibt ein Widerstandswert nach der E24 DIN (DIN: **D**eutsch **I**ndustrie **N**orm) für

$$R_1 = R_2 = 4,7k\Omega \quad (4.7)$$

Aufgrund mehrere Versuche sind für den Antialiasing filter TP1 (s.Abbildung 4.7, 4.8 und 4.9) die Werte

$$R_5 = 220\Omega \quad \text{und} \quad C_5 = 3,3nF \quad (4.8)$$

mit einer Grenzfrequenz von

$$f_g = 219kHz \quad \text{bestimmt worden.}$$



## 4 Entwicklung der Messumformer

### Gruppierung 1

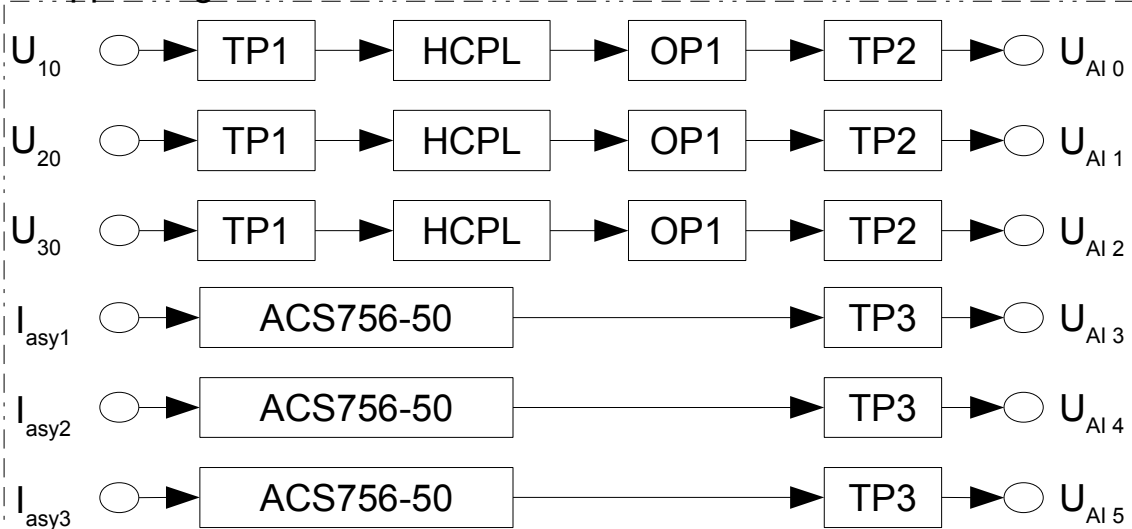


Abbildung 4.7: Blockdiagramm der Messkanäle für die Gruppierung 1

Für die Messkanalstruktur ist nochmals die Gruppierung 2 als Abbildung 4.8 mit den Messgrößen und Messsignalen (d.h. BNC-Kanal s. Tabelle 2.1 und Unterkapitel 2.4) zu zeigen.

### Gruppierung 2

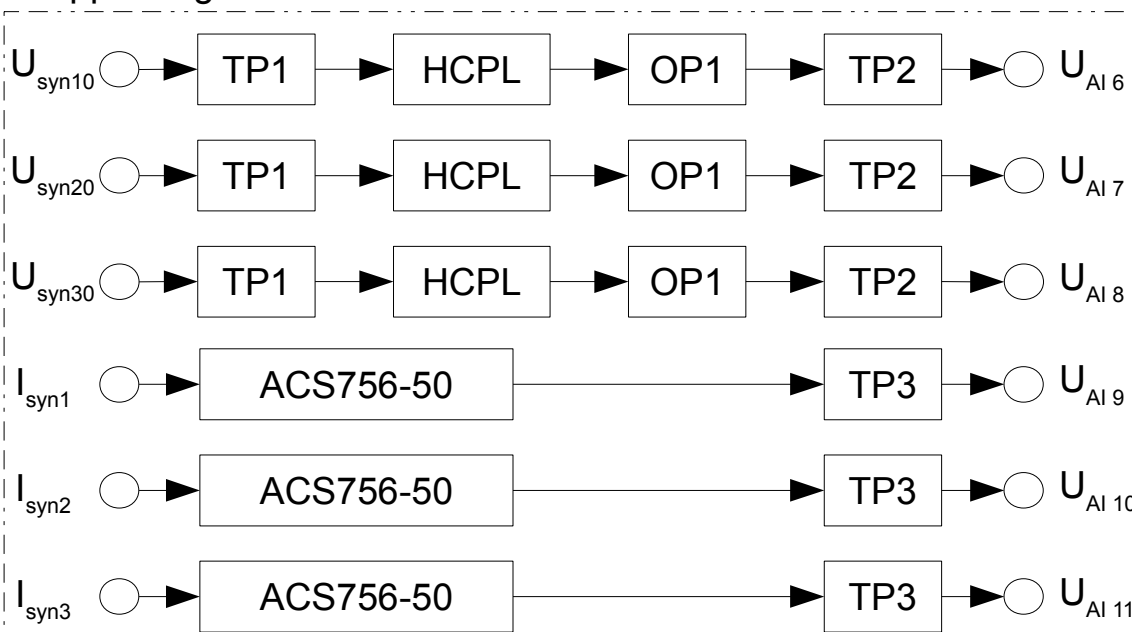


Abbildung 4.8: Blockdiagramm der Messkanäle für die Gruppierung 2

Die zweite Differenzverstärker-Schaltung OP2 (s. Abbildung 4.9), ist aus den genannten Sicherheitsgründen zu bestimmen. Ausgehend der Ungleichung (4.4) und aufgrund dem Reziprok Verhältnis von  $R_1$  zu  $V_{OUT}$ , ist der nächst höherer Widerstandswert der E24 DIN zu verwenden. Somit ergeben sich für den OP2, die Widerstandswerte

$$R_1 = R_2 = 5,1 k\Omega \quad . \quad (4.9)$$

## 4 Entwicklung der Messumformer

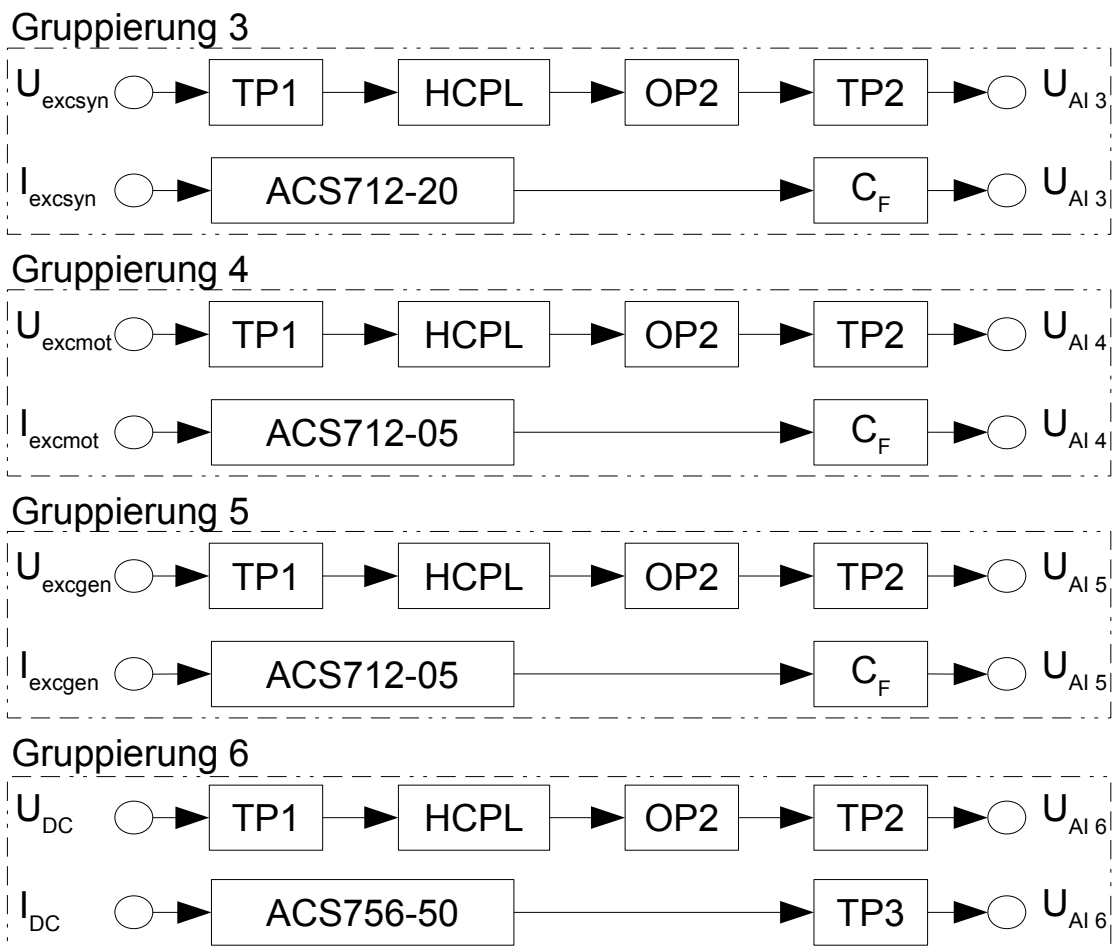


Abbildung 4.9: Blockdiagramme der Messkanäle für die Gruppierungen 3 bis 6

### 4.4.2 Die Spannungsteiler

Für die Spannungsteiler Berechnungen, ist aus der Gl.(2.11) ein resistiver Widerstand (Temperaturabhängig) und nicht eine Reaktanz Widerstand (Frequenzabhängig) erforderlich. Damit der Platzbedarf verringert wird, sind SMD-Widerstände (Baugröße 0805) statt Drahtwiderstände zu verwenden. Aus gründen der Einfachheit und Verringerung der Leistungsverluste, sind gleich verteilte Spannungsteiler (d.h. gleiche Verteilung der Vorwiderstände und nicht der Widerstandsteiler) für verschiedene Messgrößen-Spannungswerte zu bestimmen. Hierfür sind die Kriterien, der Passiven SMD-Widerstände mit ihren Kenndaten (s.Anhang 1.6 ) aufzuführen:

- Nennspannung  $U_{0805}$  entspricht 150V
- Maximal Leistung  $P_{TOT}$  ist 0,1W
- Toleranz ist  $\pm 1\%$

Die Zuordnung der nachfolgenden Gleichungen mit ihren Spannungs- und Widerstandsgrößen in der Tabelle 4.2 , ist durch eine vereinfachte Spannungsteiler Schaltung (s.Abbildung 4.10) darzustellen.

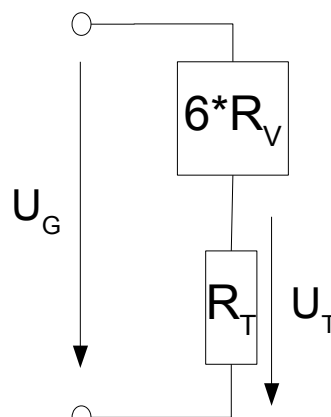


Abbildung 4.10: Spannungsteiler

## 4 Entwicklung der Messumformer

Der Trennverstärker überträgt mit  $\pm 200\text{mV}$  (s. Abbildung 4.2 mit der Differenz  $V_{+IN} - V_{-IN}$ ) durch PIN 3 und 4, das zeitliche Spannungssignal an den PIN 6 und 7. Hierfür ist zur Berechnung der Vorwiderstände  $R_V$  des Spannungsteilers, die Spannungsamplitudenwert der Messgrößen anzuwenden. Diese sind für die Maximale Gleichspannung  $U_{Nr}$  und Wechselfspannung  $U_p$  anhand der Messgrößentabelle zu übernehmen und in der Tabelle 4.2 Spalte  $U_{G,PEAK}$  einzubinden. Es ergibt sich nun folgende Spannungsteiler Gleichung aufgelöst nach

$$R_V = \frac{R_T}{6} \cdot \left( \frac{U_{G,PEAK}}{U_{T,200}} - 1 \right) \quad (\text{s. Abbildung 4.10}). \quad (4.10)$$

Mit

$$U_{G,PEAK} = U_G \cdot \sqrt{2} \quad , \quad (4.11)$$

$$U_{T,200} = 200\text{mV} \quad \text{und}$$

$$R_T = 220\Omega \quad (\text{s. Gl. (4.8)})$$

werden die Vorwiderstände  $R_V$  berechnet, dann aus der E24-Reihe bestimmt und in die Tabelle 4.2 der Spalte  $R_{VOR}$  eingefügt. Ausgehend des bekannten Vorwiderstandes, ist die zulässige Verlustleistung  $P_V$  kleiner als  $100\text{mW}$ , für jeden Vorwiderstand zu berechnen. Damit ist mit dem Effektivwert, der Spannungsgröße  $U_G$  zu rechnen mit

$$P_{V,Gesamt} = \frac{U_G^2}{6 \cdot R_{VOR}} \quad . \quad (4.12)$$

Hieraus ist die Verlustleistung der einzelnen Vorwiderstände zu berechnen, mit der Gleichung

$$P_V = \frac{P_{V,Gesamt}}{6} \quad . \quad (4.13)$$

Diese sind dann in die Tabelle 4.2 der Spalte  $P_V$  einzubinden. Somit sind die zulässigen Sicherheitsfaktoren berücksichtigt und es kann der Spannungsabfall des Widerstandsteiler  $R_T$  berechnet werden. Ausgehend der Gl. (4.10) ist folgende Gleichung

$$U_{T,PEAK} = \left( \frac{R_T}{R_T + R_{VOR}} \right) \cdot U_{G,PEAK} \quad (4.14)$$

in die Tabelle 4.2 der Spalte  $U_{T,PEAK}$  einzufügen.

### Anmerkung:

Der Faktor 6 ist durch Spannungsgröße  $U_{DC}$  mit ihrer Verlustleistung  $P_V$  entstanden. Denn eine kleinere Verteilung der Widerstände, könnte unter aufgrund der Toleranzen, über die zulässigen  $100\text{mW}$  (d.h.  $P_{TOT}$ ) führen.

## 4 Entwicklung der Messumformer

Messgrößen	$U_{G, PEAK} /V$	$R_{VOR}$ (E24-Reihe) /k $\Omega$	$P_V /mW$	$U_{T, PEAK} /mV$
$U_{DC}$	400	82	65	196,6
$U_{10}, U_{20}, U_{30},$ $U_{syn10}, U_{syn20},$ $U_{syn30}$	357	68	26	192,82
$U_{excgen}$	198	39	28	185,97
$U_{excmot}$	121	24	17	184,58
$U_{excsyn}$	88	18	12	178,89

Tabelle 4.2: Spannungsteiler mit 6 fachen Vorwiderstandswert  $R_{VOR}$ , dessen einzelne Verlustleistungen  $P_V$  und Spannungsabfall am Widerstandsteiler  $U_T$

### 4.4.3 Erwartende Messsignale

Für die Berechnungen der zu erwartende Messsignale, werden nur die Effektivwerte der Messgrößen und Messsignale einbezogen. Somit sind Übertragungsfaktoren mit den Bezeichnungen  $K$  (dessen „x“ Indexes übernimmt, die der jeweiligen Messgrößen) zu berechnen. Hierfür ist ein übersichtlicher und vereinfachter tabellarisch gefasste Darstellung geeignet. Damit sind die Spannungsteiler Toleranzen und Verstärkungsfaktoren bzw. -schaltungen einzubeziehen. Aufgrund einer anderen Softwaretechnischen Bachelor Arbeit [2], ist der Übertragungsfaktor mit der Gleichung

$$K_x = \frac{U_x}{U_{AI x}} \quad (4.15)$$

mit

$U_x$  - Effektivwert Spannung der Messgröße und

$U_{AI x}$  - Effektivwert Spannung des Messsignals

ein Bestandteil, dessen Algorithmus. Ausgehend dem Effektivwert des Spannungsabfall  $U_{T, PEAK}$ , durch einen Spannungsteiler zwischen Messgröße und dem TP1 Blockelement der Blockdiagramme (s. Abbildung 4.7, Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9), ist der Effektivwert des Messsignal zu berechnen. Es gilt also

$$U_{AI x} = U_T \cdot HCPL \cdot OPx \quad (4.16)$$

mit

HCPL - Trennverstärker mit Verstärkungsfaktor 8 und einer Toleranz von  $\pm 5\%$ ,

Op<sub>x</sub> - Differenzverstärkerschaltungen OP1 und OP2,

dann noch

$$U_T = \frac{U_{T, PEAK}}{\sqrt{2}} \quad (4.17)$$

## 4 Entwicklung der Messumformer

---

Der Verstärkungsfaktor der Differenzverstärkerschaltungen OP1 und OP2, wird mit der Gleichung

$$OP_x = \frac{R_3}{R_1} \quad (4.18)$$

bestimmt und es ergeben sich aus Gl.(4.7)

$$OP1 = \frac{10k\ \Omega}{4,7k\ \Omega} \quad (4.19)$$

und Gl.(4.9)

$$OP2 = \frac{10k\ \Omega}{5,1k\ \Omega} \quad (4.20)$$

mit

$R_3 = 10k\ \Omega$  die gesuchten Verhältnis werte.

Ausgehend der Gl.(4.11) in die Gl.(4.14), dann diese in die Gl.(4.17) und dieses in die Gl.(4.16), ergibt sich die nachfolgende Gleichung

$$U_{AI\ x} = \frac{\left(\frac{R_T}{R_T + R_{VOR}}\right) \cdot U_G \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{2}} \cdot HCPL \cdot OP_x \quad (4.21)$$

Dieses ist in die Gl.(4.15) einzubinden und man erhält mit

$$U_G = U_x \quad \text{und}$$

$$R_T = 220\ \Omega \quad (\text{s.Gl.(4.8)})$$

für den Nominellen (bedeutet: ohne Toleranzen) Übertragungsfaktor, folgende Gleichung

$$K_x = \frac{HCPL \cdot OP_x}{1 + \frac{R_{VOR}}{R_T}} \quad (4.22)$$

Die Passiven Widerstände haben eine Toleranz von  $\pm 1\%$  (s.Kriterien von 4.4.2) und der Trennverstärker eine von  $\pm 5\%$ . Diese Toleranzen sind für den Übertragungsbereich  $K_x$  Minimal bis Maximal in die Tabelle 4.3 einzubinden. Ausgehend des Nominellen Übertragungsfaktor der Gl.(4.22), sind die Minimalen und Maximalen Übertragungsfaktoren zu berechnen. Der Maximale Übertragungsfaktor ergebe sich aus dem höchsten Zählerwert und tiefsten Nennerwert. Damit gilt Umgekehrt Proportional gleiches für den Minimalen Übertragungsfaktor. Diese sind dann, in die jeweiligen Spalten der Tabelle 4.3 einzufügen.

## 4 Entwicklung der Messumformer

Übertragungsfaktoren der Messgrößen	Nominell, ohne Toleranzen	Minimal	Maximal
$K_{DC}$	129,67	118,65	142,07
$K_{10}, K_{20}, K_{30}, K_{syn10}, K_{syn20}, K_{syn30}$	99,11	90,69	108,57
$K_{excgen}$	61,7	56,46	67,6
$K_{excmot}$	38	34,77	41,62
$K_{exc syn}$	28,51	26,09	31,23

Tabelle 4.3: Übertragungsfaktoren der Messgrößen für Normal, Minimal und Maximal wert

### 4.5 Die Schaltungen

Die Schaltungen werden durch den Schaltplan der Gruppierung 6 erklärt. Hierfür ist das Schaltbild der Gruppierung 6 aus dem Anhang unten aufgeführt.

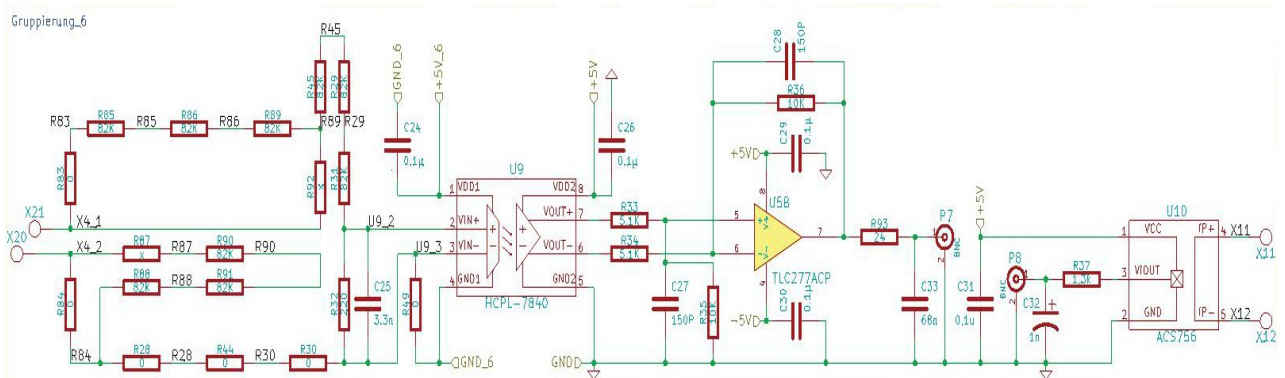


Abbildung 4.11: Zur Erläuterung der Schaltungen Schaltplan Gruppierung 6

Aufgrund von Platzmangel der Gruppierung 3 bis 6, ist ein Hierarchieplan (auch Hauptplan genannt s. Anhang 3) erstellt worden mit. Hierzu wurden die Globalen Labels für die Spannungsversorgungen auf ein separaten Schaltplan (s. Anhang 3) gezeichnet.

#### Anmerkung:

Die Schaltpläne wurden mit einem Labor-PC und vorinstalliertem KiCad Software erstellt. Das Labor-PC hat keine richtige Datierung.

#### 4.5.1 Die Sensoren

Für die Erstellung eines Schaltplans, sind die Symbole der Sensoren (s. Abbildung 4.12) zu zeichnen. Hierbei ist der Buchstabe U für die Referenzen der Bauteilezuweisungen vergeben worden. Die Symbole sind nachdem „Typical Application“ (s. Abbildung 4.4) oder „functional diagram“ (s. Abbildung 4.2) nachgezeichnet.

## 4 Entwicklung der Messumformer

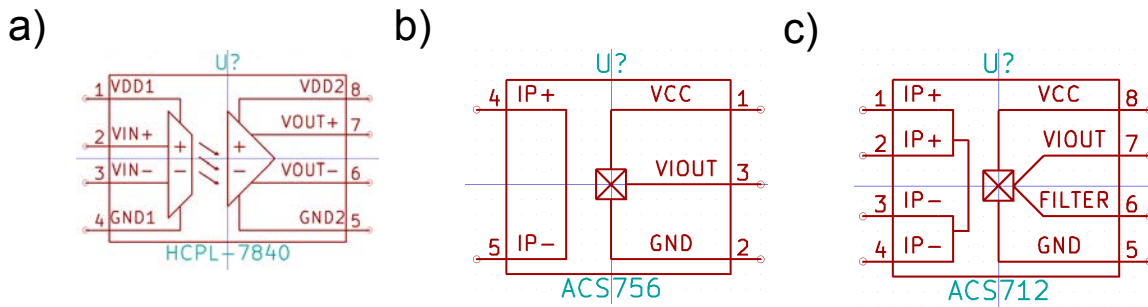


Abbildung 4.12: Sensor Symbole für a) Trennverstärker HCPL-7840, b) Hallensensor ACS756-50 und c) Hallensensoren ACS712

Ausgehend der Datenblätter (s.Anhang 1.1 , 1.2 und 1.4 ) der Sensoren, sind noch an den Spannungsgrößen  $V_{DD1}$  ,  $V_{DD2}$  und  $V_{CC}$  (s.Abbildung 4.12) jeweils Keramik-Kondensatoren mit 100nF einzubinden. Diese werden dann in den jeweiligen Schaltpläne zwischen den Spannungsgrößen und Masse vernetzt.

### 4.5.2 Spannungsteiler

Die Auflagen der Spannungsteiler aus dem Unterkapitel 4.4.2 sind in der Abbildung 4.13 umgesetzt worden. Es sind noch zusätzliche SMD-0805 Widerstands Plätze eingebunden. Hiermit kann in einer anderen Arbeit, durch Berechnungen der Vorwiderstände mit einer Anzahl von 12 statt 6, die Außenleiterspannungen eingeführt werden. Die Widerstandssymbol mit „x“ verzeichnet, stellen einen Widerstandsplatz ohne Widerstands Vergabe. Zusätzlich sind hier die jeweiligen Netzwerke zwischen den Widerstände bezeichnet worden. Dieses wird dann für den nächsten Unterkapitel 4.6 Platinenlayouts mittels DR verwendet.

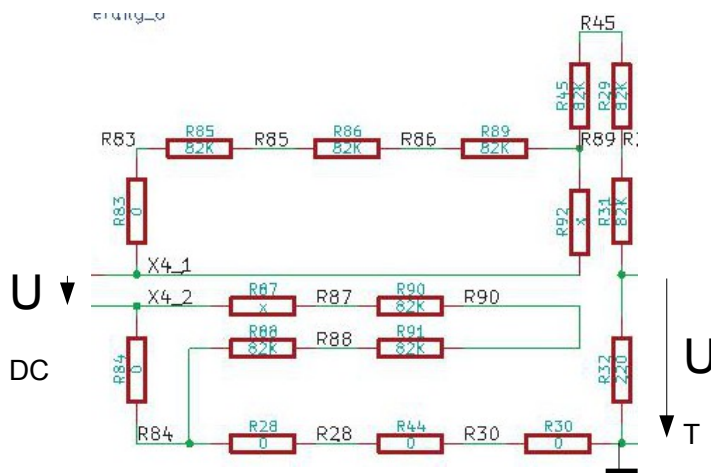


Abbildung 4.13: Spannungsteiler Beispiel der Gruppierung 6

### 4.5.3 Tiefpass-filter TP1

Für den Tiefpass-filter TP1 (s.z.B.Abbildung 4.7) sind nach Gl.(4.8) und der Note 1 (s.Anhang 1.4 ), der PIN 3 mit 4 zu vernetzen. Daher ist ein Widerstand Symbol zwischen den genannten PIN einzubinden. Damit man einen höheren

## 4 Entwicklung der Messumformer

Widerstand einsetzen oder gar die Verbindung zwischen PIN 3 und 4 unterbinden kann.

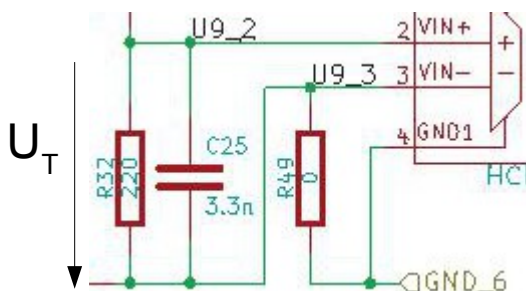


Abbildung 4.14: Tiefpassfilter der Gruppierung 6 mit einer einer Veränderung

### 4.5.4 Versorgungsspannung

Die Versorgungsspannung  $V_{DD2}$  und  $V_{CC}$  der Sekundärseite aller Sensoren sind mit  $\pm 5V$  durch das Symbol für Klemmen in den Schaltplänen einzubinden. Die Trennverstärker der Gruppierungen 1 und 2, erhalten für die Spannungsgröße  $V_{DD1}$  eine gleiche vernetzte Versorgungsspannung von  $+5V$  (s.Abbildung 4.15).

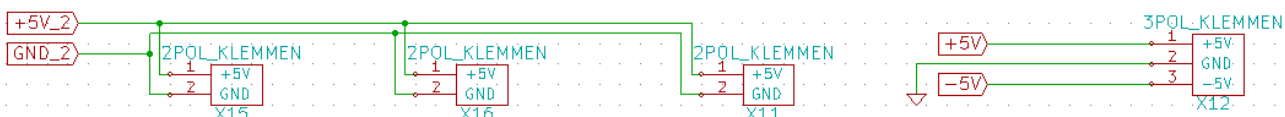


Abbildung 4.15: Versorgungsspannung der Gruppierungen 1 und 2

Bei der Gruppierung 3 bis 6 erhalten die Trennverstärker jeweils eine separate Versorgungsspannung  $V_{DD1}$  mit  $+5V$  (s.Abbildung 4.16). Denn das Erregerfeld der elektrischen Maschinen (s.Abbildung 2.3) darf nicht gemeinsam verbunden werden. Diese dürfen auch nicht mit den Zwischenkreis verschaltet werden.

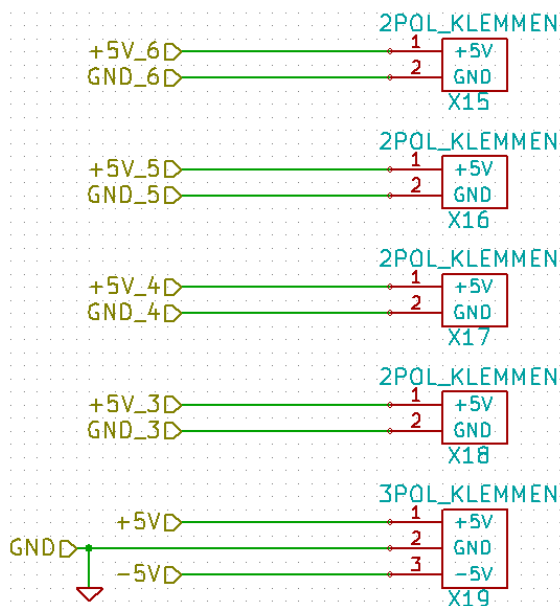


Abbildung 4.16: Versorgungsspannung der Gruppierungen 3 bis 6



## 4 Entwicklung der Messumformer

### 4.6 Platinenlayout und Gehäuse

#### 4.6.1 Platinenlayout

Um auf die verarbeiteten Platinen einzugehen, soll kurz das Platinenlayout grob erklärt werden. Für das Platinenlayout sind Vorgaben der Feinmechanik Werkstatt der 7. Ebene des Hauptgebäudes von der Fachhochschule Deutz Köln einzubeziehen. Diese sind:

- Leiterplatte Standard FR4
- Leiterbahnstärke max. 35 $\mu$ m
- Leiterbahnabstände zueinander min. 0,2mm (empfohlen 0,3mm)
- Leiterbahnbreite min. 0,2mm (empfohlen 0,3mm)
- Bohrungen min. 0,5mm

Der Abstand von einer Sicherheitseinbaubuchse Mittelpunkt zu der anderen ist mit 19mm zu beaufschlagen (s. Abbildung 4.18).

Der Spannungsteiler ist nach der Abbildung 4.13 eine annähernde geometrischen Anordnung mit den Leiterbahnen zu vernetzen.

Die Padfläche des Hallensensor ist aufgrund der entstehende Temperatur wegen der Strommessung zu vergrößern. Die Padfläche wird dann übermäßig verzinkt, denn das Zinn besteht aus Metall und Metall leitet Wärme ab.

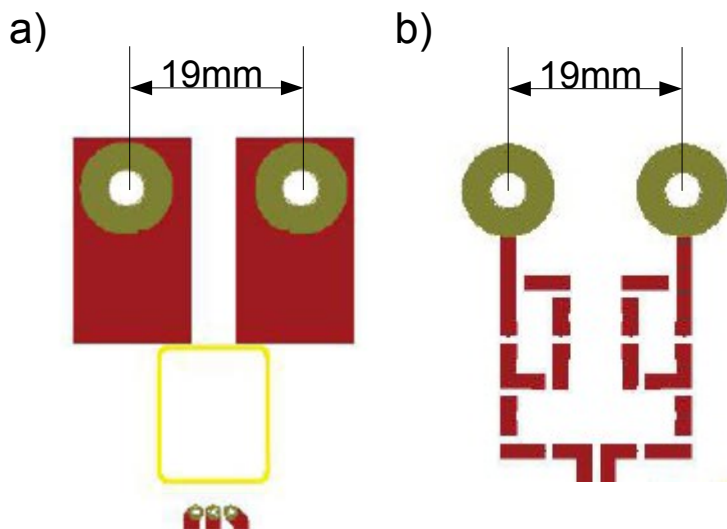


Abbildung 4.17: Platinenlayout Vorderseite des **a)** Padfläche für den Strom, **b)** Spannungsteilers und Lötäugen mit 19mm Abstand

Für die Versorgungsspannung  $\pm 5V$  sind breite Leiterbahn mit bis zu 1,5mm umzusetzen. Somit entsteht ein geringerer Widerstand zwischen den Sensoren Spannungsgrößen  $V_{DD1}$ ,  $V_{DD2}$  und  $V_{CC}$  und der Versorgungsspannung. Denn es gilt beim Platinenlayout bzgl. Leiterbahnbreiten, Durchkontaktierung oder Padflächen der Spezifische Widerstand. Somit ist der Widerstand umgekehrt Proportional zu der Fläche, die hier die breite ist oder die Massenfläche. Die Massenfläche (s. Anhang 4) ist auf der Rückseite der Sekundärseite zu verlegen. Damit ist eine sichere Galvanischen-Trennung und höhere

## 4 Entwicklung der Messumformer

Isolationsspannung gewährleistet.

Bei einer Durchkontaktierung entstehen Restringe, die eine geeignete Gegenmaßnahme benötigen. Diese sind:

- Durchkontaktierung mit Silberdraht (also Kupferdraht mit Silberbeschichtung)
- Löttauge der Durchkontaktierung mit 2,5 fach größer als der Draht

Ausgehend der Abbildung 4.18 (aus dem Anhang 4 ), sind Passive Widerstände und Kondensatoren für den Tiefpass-filter (TP2) nah an der BNC-Buchse (P3) und bei der Differenzverstärker-Schaltung (OP2) nah an dem Operationsverstärker anzusetzen.

Die Platinen sind mit der Rückseite zu dem Gehäuse Deckel hin zu befestigen. Somit ist das bei der Entwicklung der Platine zu berücksichtigen, indem die BNC-Buchsen auf der Rückseite der Platine angesetzt und verzinnt werden. Dabei sind die Stützpfeile der BNC-Buchse mit der Vorderseite zu verzinnen.

Damit wird der Drehmoment kraft bei anschließen eines BNC-Stecker Laborleitung als zusätzliche Stütze entgegengewirkt.

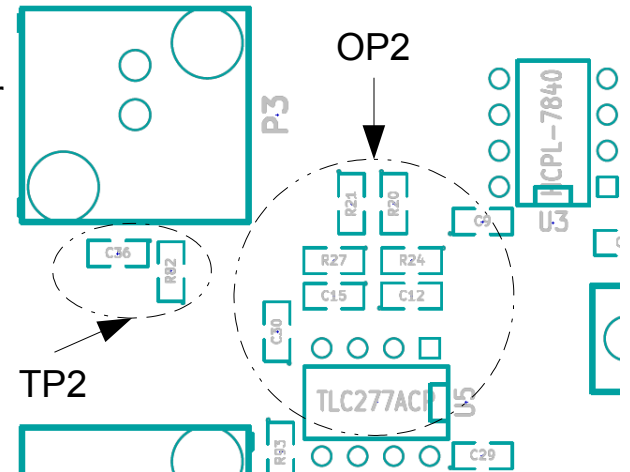


Abbildung 4.18: Platinenlayout Siebdruck Teilauszug

Position	Vorteil	Nachteil
Gehäuseboden	Keine Schubkraft wirkend auf die Platine	Spannungsabfall an den Leitungen Abschirmung zwischen BNC-Buchse und Platinenkontakt PIN Zusätzliche kosten für Abstandhalter Schwierigkeiten bei der räumlichen Einbindung der Hilfsenergie
Gehäusedeckel	Direkt Zugriff auf die Bauelemente Keine Leitungen geringe Messsignal Störgrößen Platzreserve im Gehäuse	Demontage schwierig

Tabelle 4.4 Pro-Contra Platinen Einbau im Gehäuseboden oder am -Deckel

## 4 Entwicklung der Messumformer

---

Ausgehend der Tabelle 4.4 überwiegen die Nachteile des Gehäuseboden Einbau gegenüber den Vorteilen des Gehäusedeckel Einbaus.  
Zur Vorführung werden die Platinen der Gruppierungen 1 und 2 hier gezeigt.

## 4 Entwicklung der Messumformer

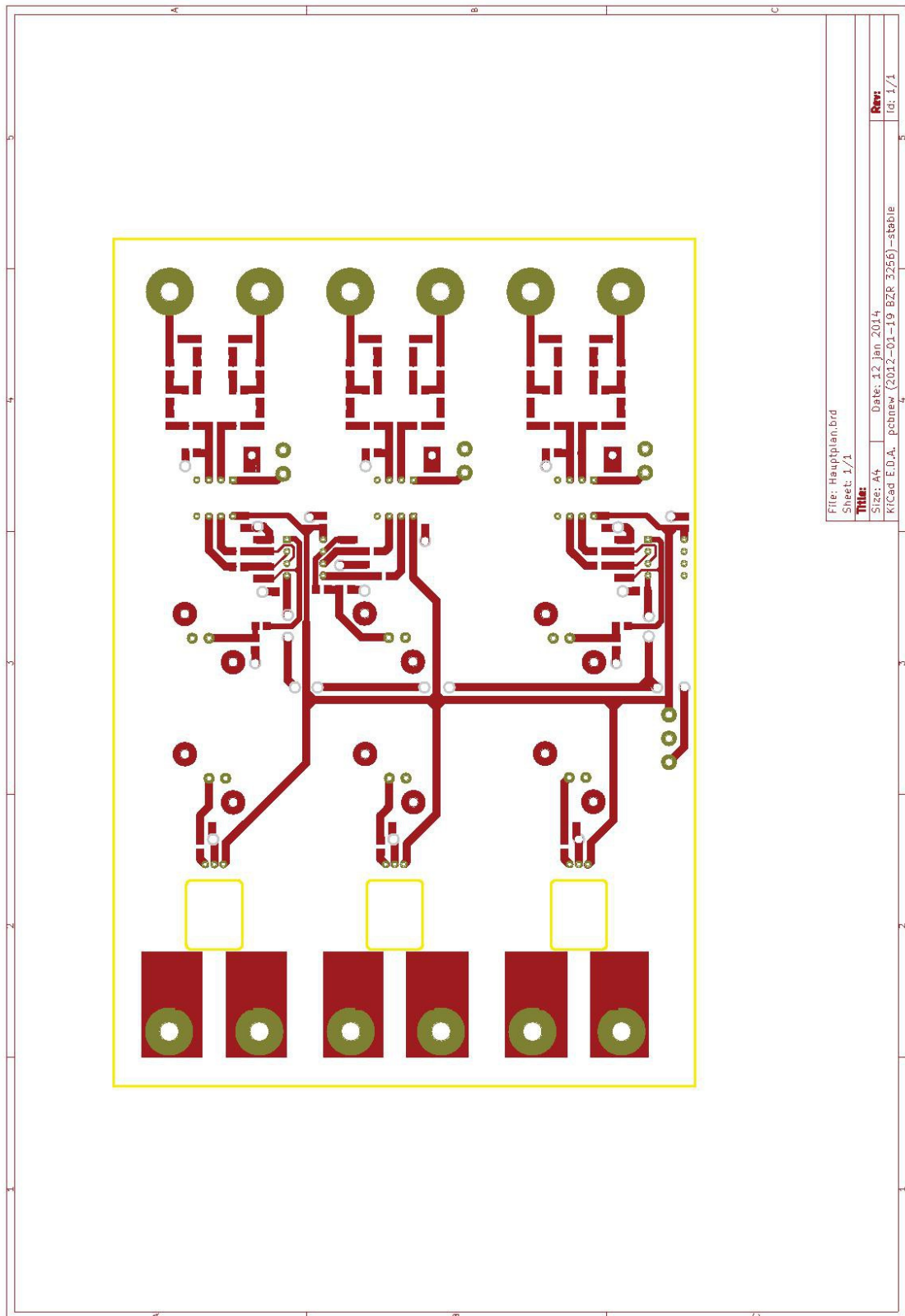


Abbildung 4.19: PCB-Layout Vorderseite (top) der Gruppierungen 1 und 2

# 4 Entwicklung der Messumformer

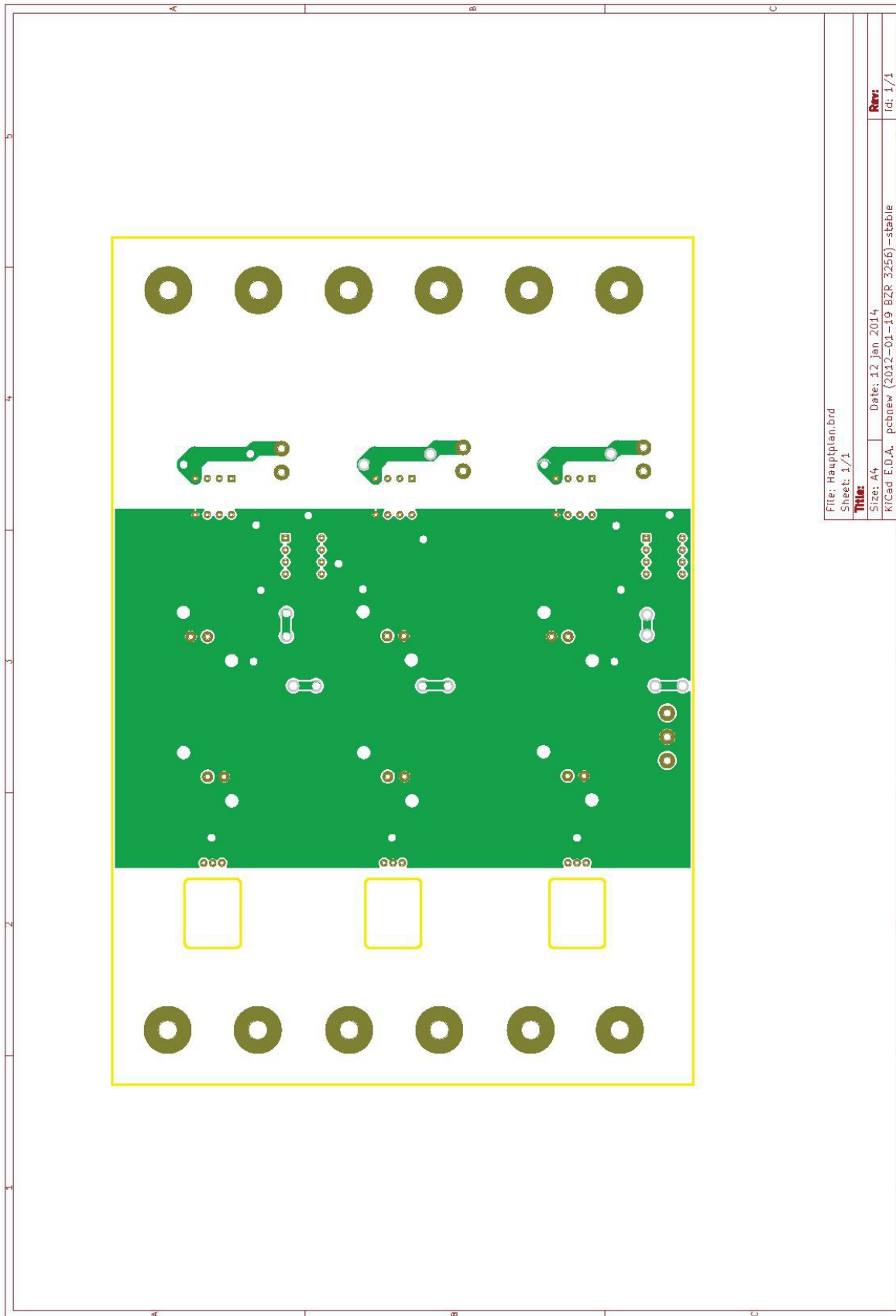


Abbildung 4.20: PCB-Layout Rückseite (bottom) der Gruppierungen 1 und 2

## 4 Entwicklung der Messumformer

### 4.6.2 Gehäuse

Es ist ein Gehäuse für die Befestigungen und Installation der Platine am Gehäusedeckel zu ersuchen das die folgenden Kriterien erfüllt. Diese sind:

- Schlagfestigkeit des Gehäuse, damit diese beim herunterfallen auf dem Maschinenhallenboden nicht beschädigt wird
- Staubdicht, damit die Kriechstromfestigkeit erhalten wird in der Maschinenhalle
- Aufgrund von Morgentau, kann sich Feuchtigkeit unterhalb der Sensoren absetzen und somit zu einem Kurzschluss führen
- Die Sekundärseite bzw. Massenfläche der Platine, die ihre Messsignale über die BNC-Buchse sendet, hat keine direkt Verbindung zum PE Leiter. Vorsicht beim Kurzschluss, daher eine Elektrische Isolierung des Gehäuses erforderlich

Zu den genannten Kriterien ist das folgende Gehäuse von Fibox identifiziert worden, mit den Kenndaten:

- Schutzart (EN 60529): IP 66/67
- Schlagfestigkeit (EN 62262): IK 08
- Elektrische Isolierung: Voll isoliert

Ausgehend der Tabelle 4.4 mit den Vorteil der Platzreserve, wird die Hilfsenergie (s.Abbildung 2.4) der Schaltnetzteile für die Sensoren mittels einer Blockschaltung dargestellt anhand der Abbildung 4.21 und Abbildung 4.23.

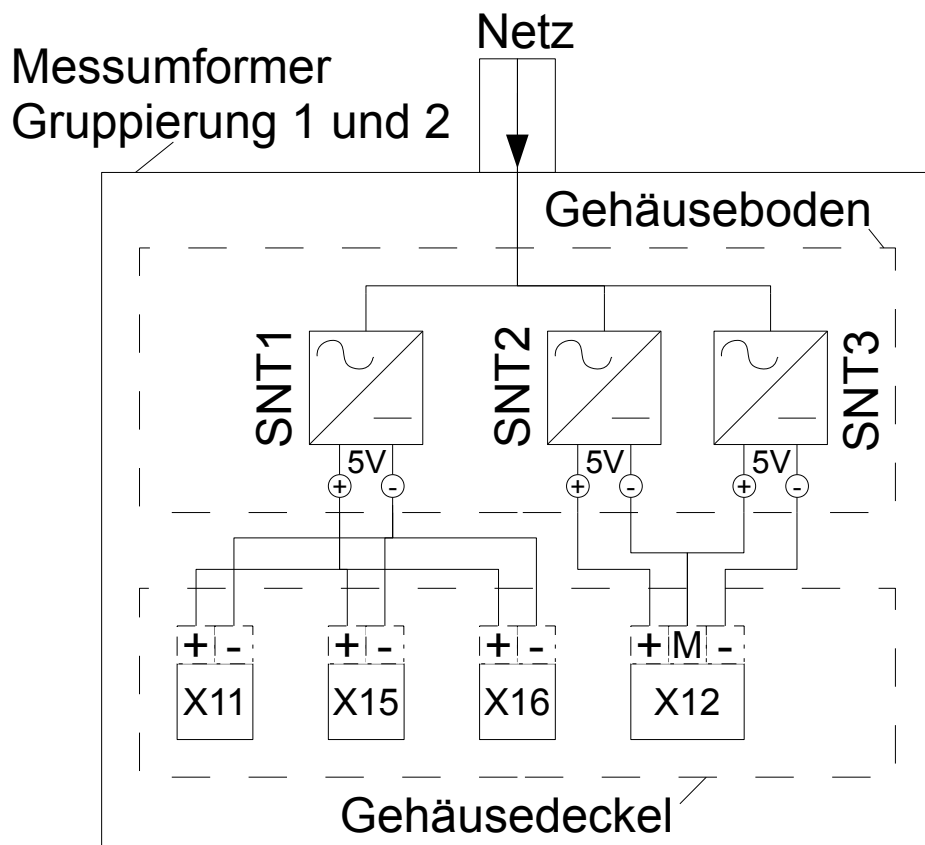


Abbildung 4.21: Blockschaltung der Hilfsenergie mit + oder - 5V/8W und Klemmen für Gruppierungen 1 und 2 im Gehäuse

## 4 Entwicklung der Messumformer

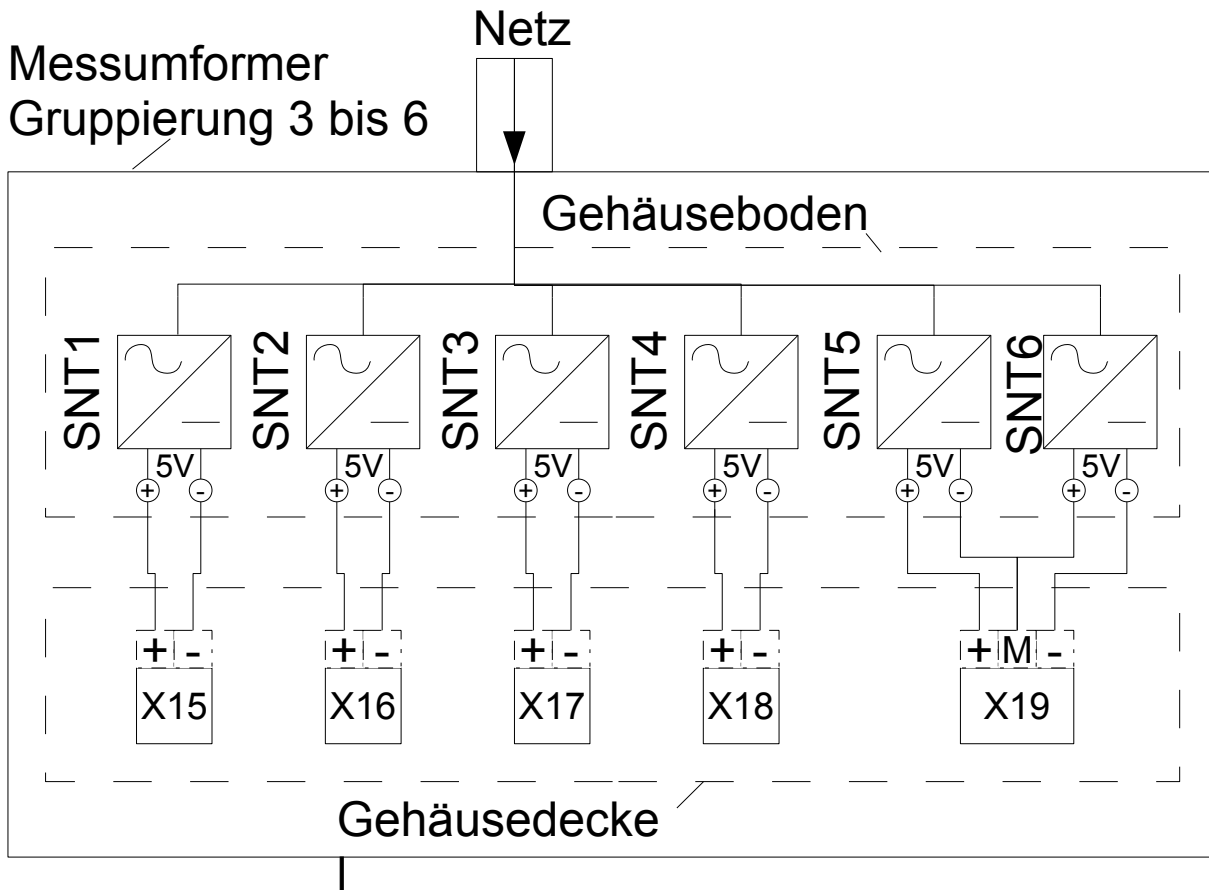


Abbildung 4.22: Blockschaltung der Hilfsenergie mit + oder - 5V/8W und Klemmen für Gruppierungen 3 bis 6 im Gehäuse

Für die Identifizierung des Null-Leiter sind Sicherheitseinbaubuchsen in blauer Farbe auf dem Gehäusedeckel installiert (s.Abbildung 4.23).

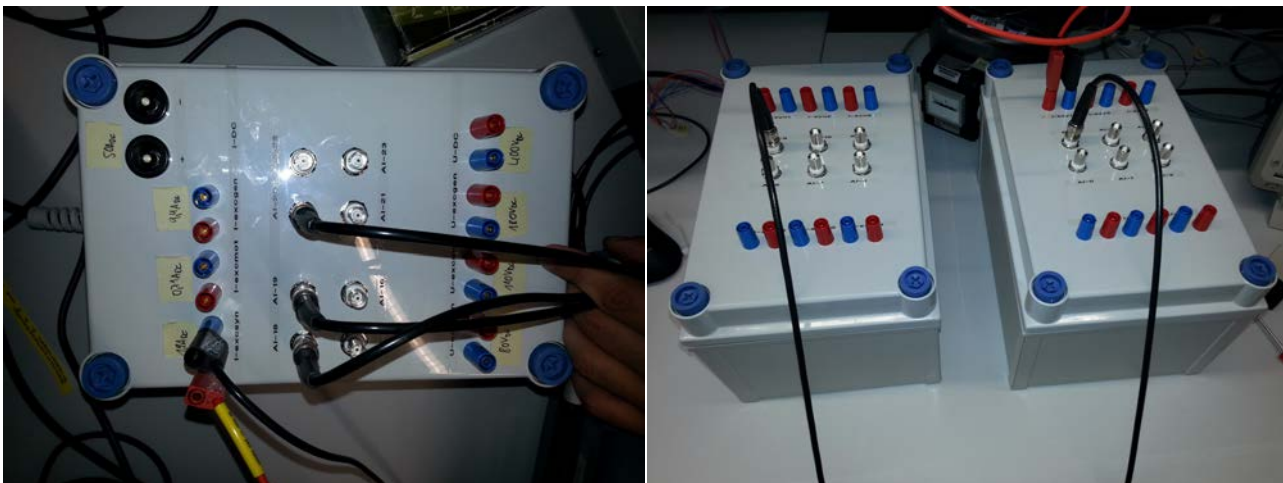


Abbildung 4.23: **Linkes** Bild zeigt die Messumformer Gruppierungen 3 bis 6, **rechts** weit außen die Messumformer Gruppierung 1 und in der **Mitte** die Messumformer Gruppierung 2

An den Sicherheitseinbaubuchsen und BNC-Buchsen sind jeweils transparente Beschriftungen aufgeklebt. Somit kann man die Messgrößen und Messsignale (s.Tabelle 2.1) korrekt anschließen an den jeweiligen Messpunkten oder Anschlussblock (s.Abbildung 2.4).

### 5 Messungen der Messumformer

#### 5.1 Versorgungsspannung

Die Versorgungsspannung der Schaltnetzteile ist aufgrund einer gemessenen Störgröße zu prüfen. Denn diese Störgröße lässt sich mit den Labornetzteilen nicht wiedergeben. Es ist bei den Strommessungen besonders auffällig, das Spannungsspitzen am Messsignal  $U_{AI\ X}$  mittels eines Oszilloskopen zu sehen sind.

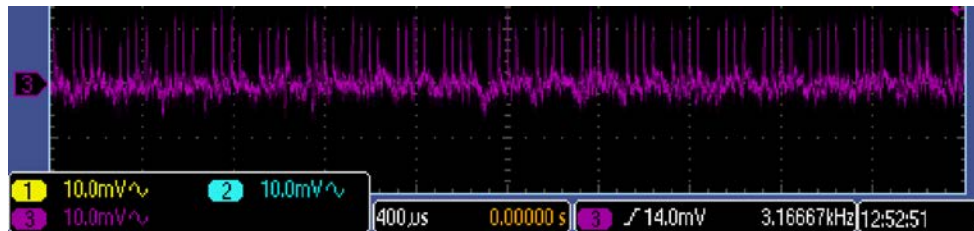


Abbildung 5.1: Störsignal am Messsignal durch Schaltnetzteil

Dieses Störsignal wurde nach Abbildung 4.21 an den Schaltnetzteil SNT2 festgestellt. Da Elektrolyt Kondensatoren (ElKo) nicht so schnell zeitlich gesättigt werden, sind mit mindestens drei solcher Kondensatoren Versuchsreihen durchzuführen.

##### 5.1.1 Versuchsaufbau

Der ElKo ist nach Abbildung 4.21 mit dem Positiven Draht Potenzial an die +5V Reihenklemme anzuschließen. Das Negative Draht Potenzial wird an der Masse der Reihenklemme angeschlossen.

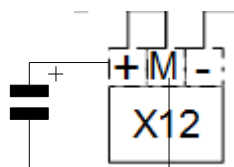


Abbildung 5.2: ElKo Anschluss an X12 Reihenklemme

Während des Leerlaufversuch bei der Messgröße  $I_{asy1}$ , ist das Messsignal  $U_{AI\ 3}$  mit zuerst  $47\mu F$ , dann  $470\mu F$  und zum Schluss  $4700\mu F$  zu messen. Das Messsignal wird an dem Messkanal 3 des Digitalen Oszilloskopen angeschlossen. Aufgrund des Offsets der Hallsensoren ist auf AC Messung umzustellen, damit der Vollausschlag des Displays zur Messung verwendet werden kann.

##### 5.1.2 Messergebnisse

Hier werden kurz die Digitalen Messdatenerfassung durch den Oszilloskopen wiedergeben. Messkanal 1 und 2 sind zu vernachlässigen.



## 5 Messungen der Messumformer



Abbildung 5.3: Messsignal  $U_{AT}$  mit EIko C entspricht  $47\mu F$

Die Abbildung 5.3 gibt zeigt kaum eine Veränderung zu der Abbildung 5.1.

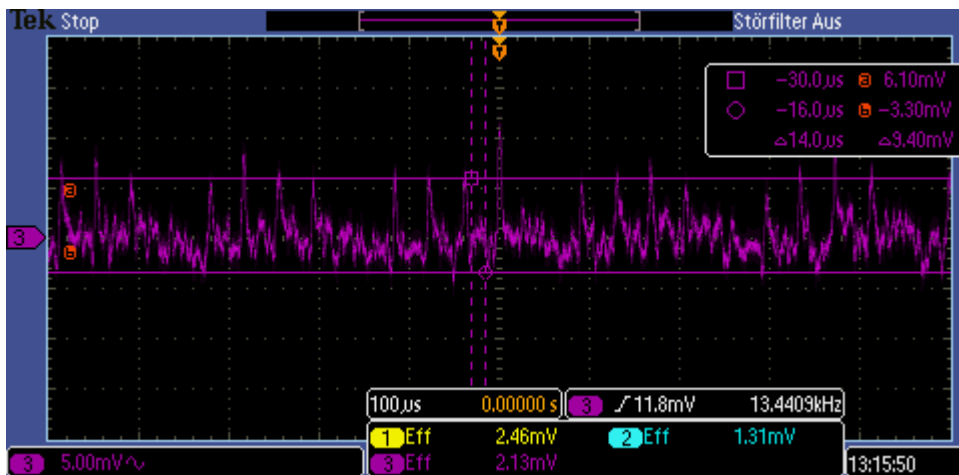


Abbildung 5.4: Messsignal  $U_{AT}$  mit EIko C entspricht  $470\mu F$

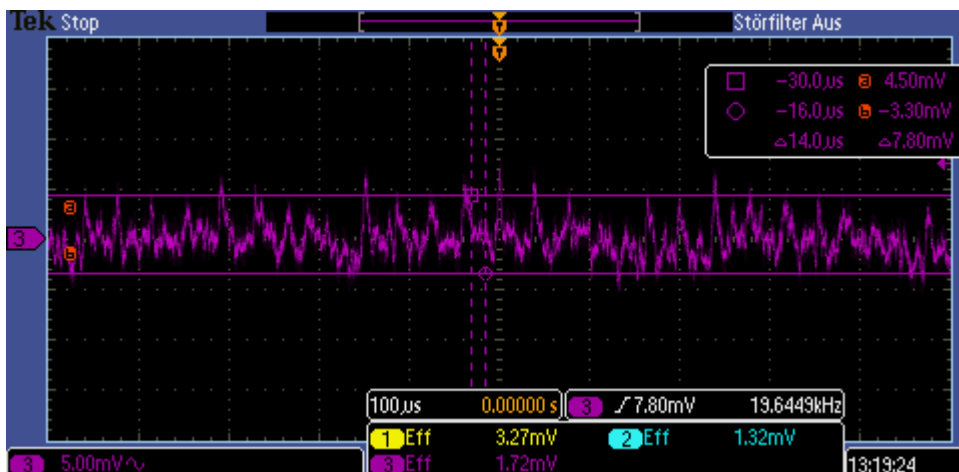


Abbildung 5.5: Messsignal  $U_{AT}$  mit EIko C entspricht  $4700\mu F$

Mit dem Cursor des Digitalen Oszilloskopen kann man die Differenzspannungen zwischen Spitzen Amplitudenwert und Tiefen Tal wert ermitteln. Die Abbildung 5.5 zeigt eine Differenz von 7,8mV mit einem EIko von  $4700\mu F$  und könnte

## 5 Messungen der Messumformer

dem 470µF (s.Abbildung 5.4) mit 9,4mV bevorzugt werden. Baubedingt ist es nicht möglich den ElKo mit 4700µF in der Reihenklemme X12 zu verdrahten. Da die Reihenklemmen Liftkammer nicht genügend Raum bietet für die Dicken Draht des 4700µF Elko. Somit ist der ElKo mit 470µF an X19 und X12 der Messumformer Gruppierung 1 und 2 zu verdrahten.

### 5.2 Messungen der Übertragungsfaktoren

Die Übertragungsfaktoren werden ausgehend aus der Gl.(4.15) mit  $U_X$  der Eingangs Messgröße und  $U_{AI X}$  das Ausgangs Messsignal gemessen. Dies soll durch ein Übertragungsschaltbild nochmals dargestellt werden.

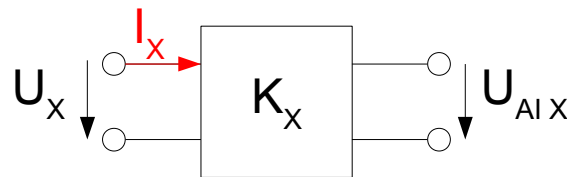


Abbildung 5.6: Schaltbild für die Übertragung der Spannung  $U_X$  oder des Stromes  $I_X$  zu dem Messsignal  $U_{AI X}$

Es ist aus der Messwertetabelle die Messabweichung mit Hilfe von OpenOffice Calc zu berechnen. Somit ist ausgehend der Gl.(4.15) der Mittelwert der Messungen mit folgender Gleichung zu berechnen

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad [3] \quad (5.1)$$

Damit ist dann die Standardabweichung mit

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad [3] \quad (5.2)$$

Zu berechnen und daraus folgt die Gleichung

$$\Delta \bar{x} = \frac{t \cdot s}{\sqrt{N}} \quad [3] \quad (5.3)$$

Für die Messabweichung. Der Studentenfaktor  $t$  ist gleich 2,3 bei 10 Messungen und der statistischen Sicherheit  $P$  entspricht 95% für Industrie und Technik. Hieraus resultiert dann das Vollständige Ergebnis dieser Messungen mit

$$\bar{x} \pm \Delta \bar{x} \quad [3] \quad (5.4)$$

dem Messergebnis  $\bar{x}$  und der Messunsicherheit  $\pm \Delta \bar{x}$  für den Übertragungsfaktor.

Zu dem Messergebnis  $\bar{x}$  ist noch ein Diagramm für den Vergleich der Schaltnetzteile mit der Referenz Labornetzteile für die Spannungsversorgung zu zeigen.

## 5 Messungen der Messumformer

### 5.2.1 Versuchsaufbau

Für die Spannungsmessungen wird ein Stell-Trenntransformator von Philips als Eingangs Messgröße an den jeweiligen Sicherheitseinbaubuchsen der Messumformer mit Wechselspannung gemessen. Die Eingangs Messgröße wird mit einem Differenzastkopf gemessen und mit dem Messkanal 1 des Digital Oszilloskopen verbunden. Das Ausgangs Messsignal wird mit einem BNC-BNC Koaxial Laborleitung an dem Messkanal 2 des Digital Oszilloskopen angeschlossen.

Die Strommessung wird mit einem großen Labornetzteil an der Eingangs Messgröße an den jeweiligen Sicherheitseinbaubuchsen der Messumformer mit Gleichstrom durchgeführt. Die Eingangs Messgröße wird mit einem Nullflusswandler gemessen und mit dem Messkanal 1 des Digital Oszilloskopen verbunden. Das Ausgangs Messsignal wird mit einem BNC-BNC Koaxial Laborleitung an dem Messkanal 2 des Digital Oszilloskopen angeschlossen.

### 5.2.2 Messergebnisse

#### 5.2.2.1 Spannungsmessungen

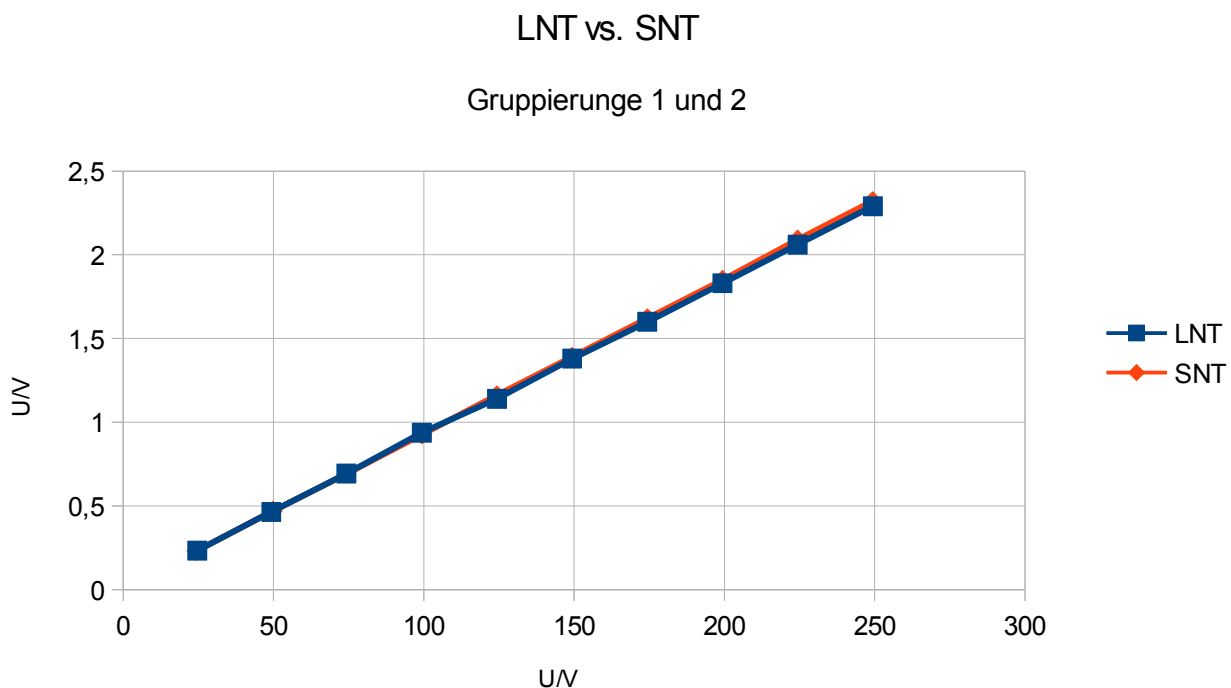


Abbildung 5.7: Spannungsmessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 1 und 2 LNT vs. SNT

Die Messwertetabellen und Berechnungen sind im Anhang 5 .

## 5 Messungen der Messumformer

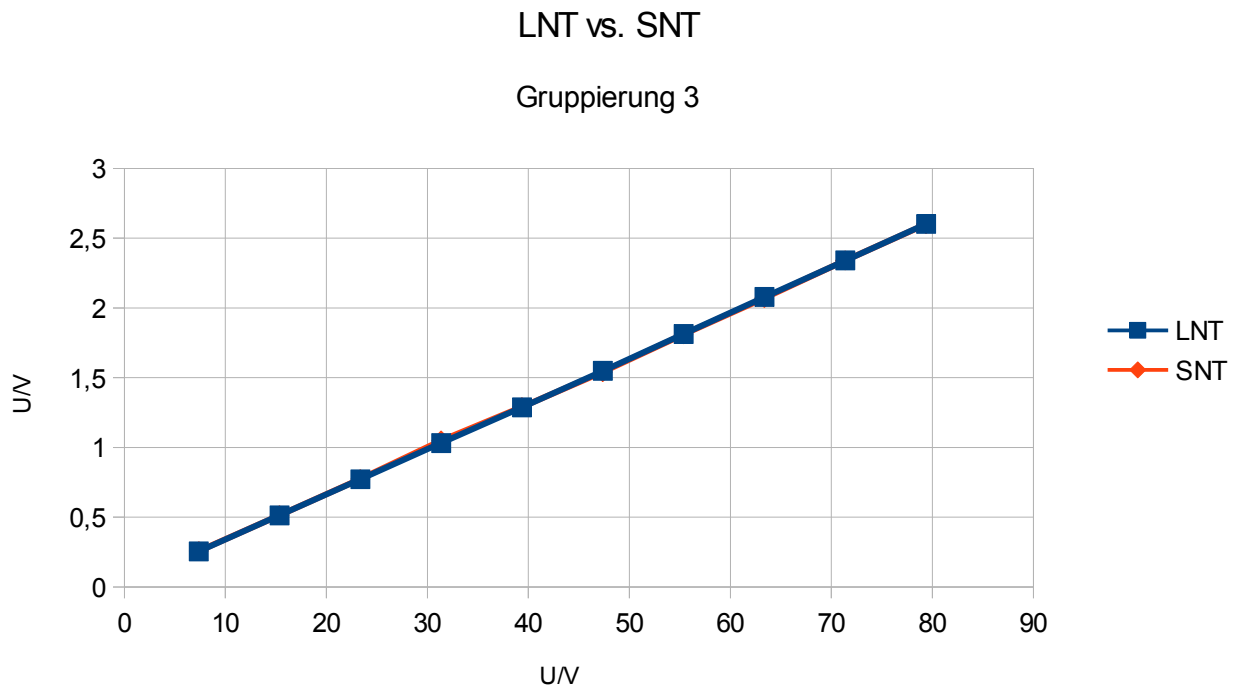


Abbildung 5.8: Spannungsmessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 3 LNT vs. SNT

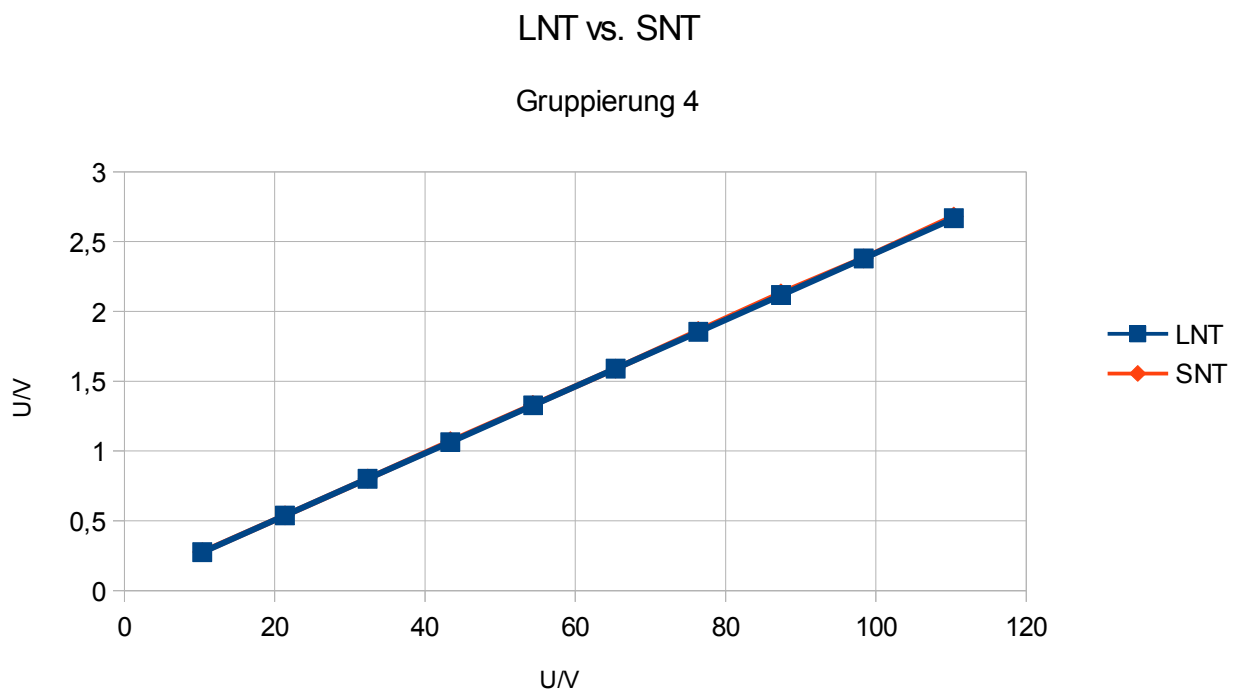


Abbildung 5.9: Spannungsmessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 4 LNT vs. SNT

## 5 Messungen der Messumformer

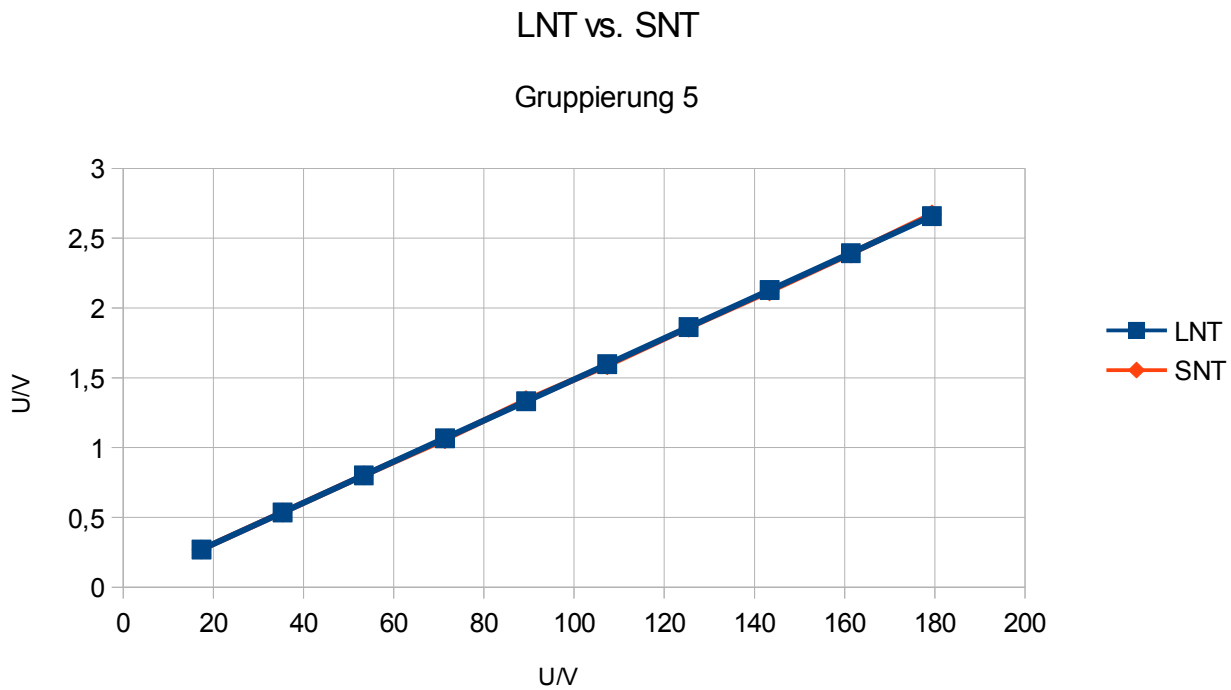


Abbildung 5.10: Spannungsmessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 5 LNT vs. SNT

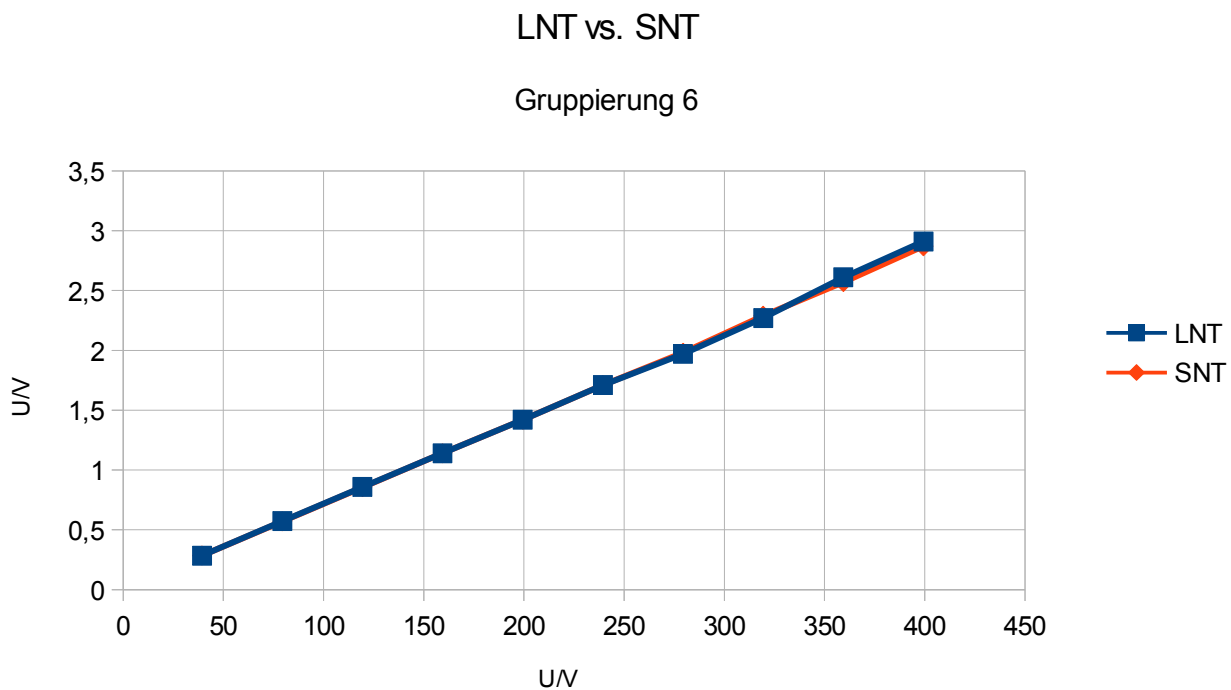


Abbildung 5.11: Spannungsmessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 6 LNT vs. SNT

## 5 Messungen der Messumformer

Messgrößen Übertragungsfaktor	Messergebnis Übertragungsfaktor	Messunsicherheit	Standard- abweichung
K <sub>10</sub>	107,1	0,523	0,723
K <sub>20</sub>		0,582	0,8
K <sub>30</sub>		0,523	0,72
K <sub>syn10</sub>		0,526	0,74
K <sub>syn20</sub>		0,581	0,8
K <sub>syn30</sub>		0,521	0,72
K <sub>excsyn</sub>	30,22	0,43	0,59
K <sub>excmot</sub>	40,46	0,785	1,08
K <sub>excgen</sub>	66,82	0,704	9,68
KDC	139,6	0,557	0,766

*Tabelle 5.1 Messergebnis und Messunsicherheit bzw. Standardabweichung für den Übertragungsfaktor der Spannungsmessung der Schaltnetzteile*

Grüner Balken ist das Messergebnis für den Übertragungsfaktor und die gelben Balken für die Messunsicherheit und Standardabweichung in der Calc Tabelle (s.Anhang 5 )

### 5.2.2.2 Strommessungen

Die Messwertetabellen und Berechnungen sind im Anhang 6 .

## 5 Messungen der Messumformer

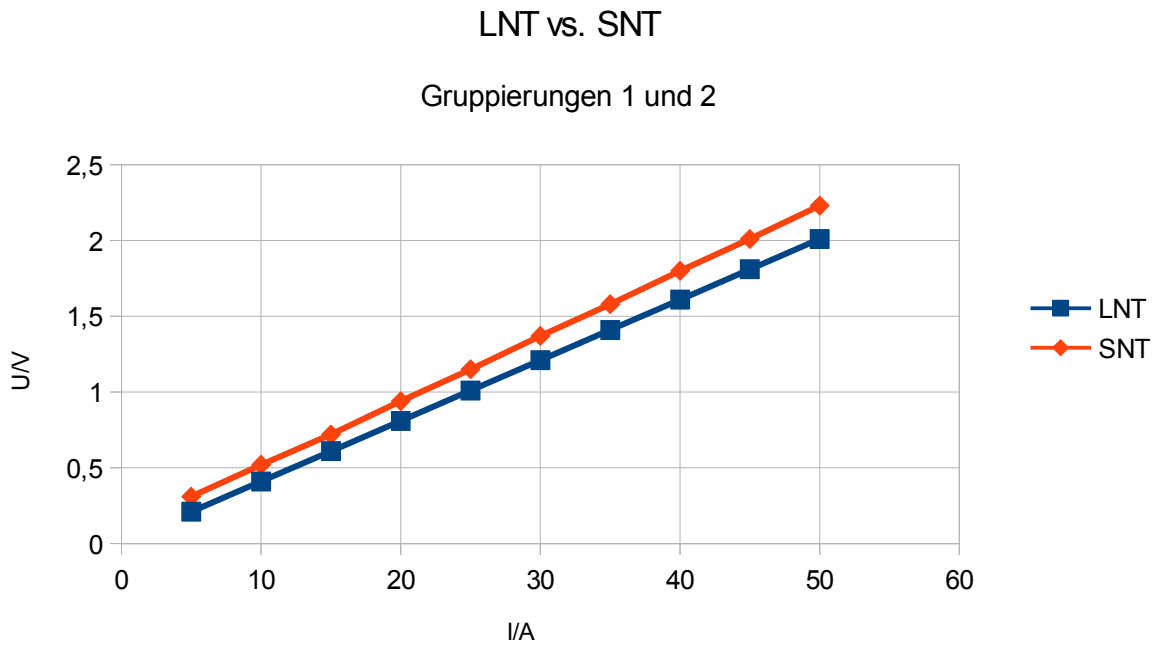


Abbildung 5.12: Strommessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 1 und 2 LNT vs. SNT

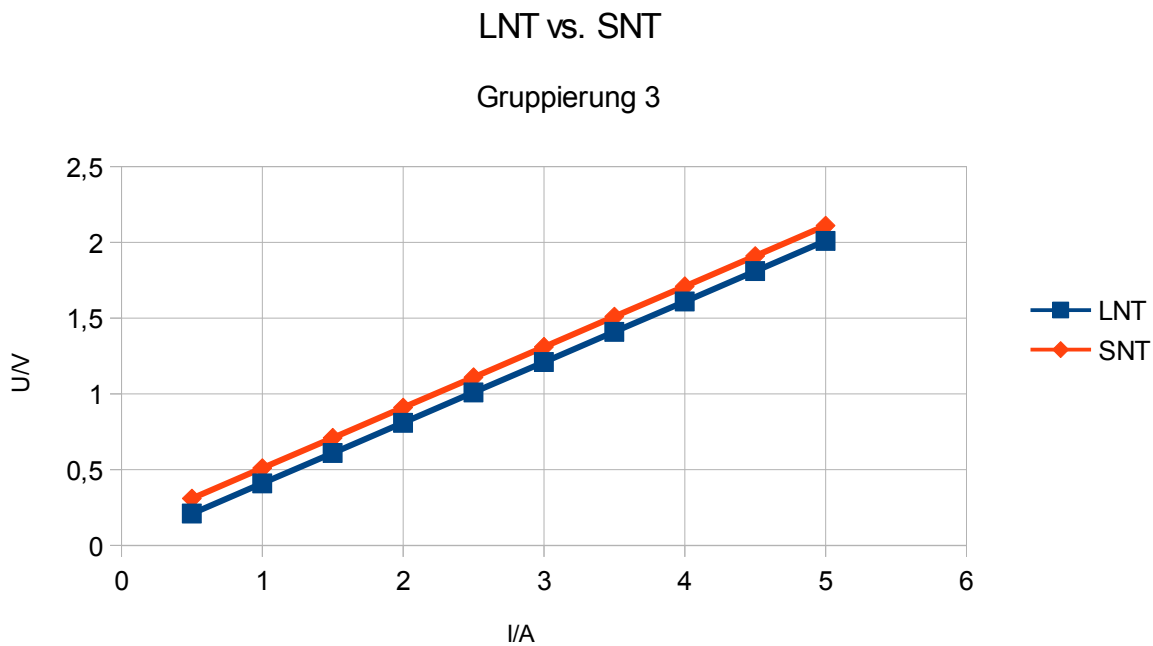


Abbildung 5.13: Strommessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 3 LNT vs. SNT

## 5 Messungen der Messumformer

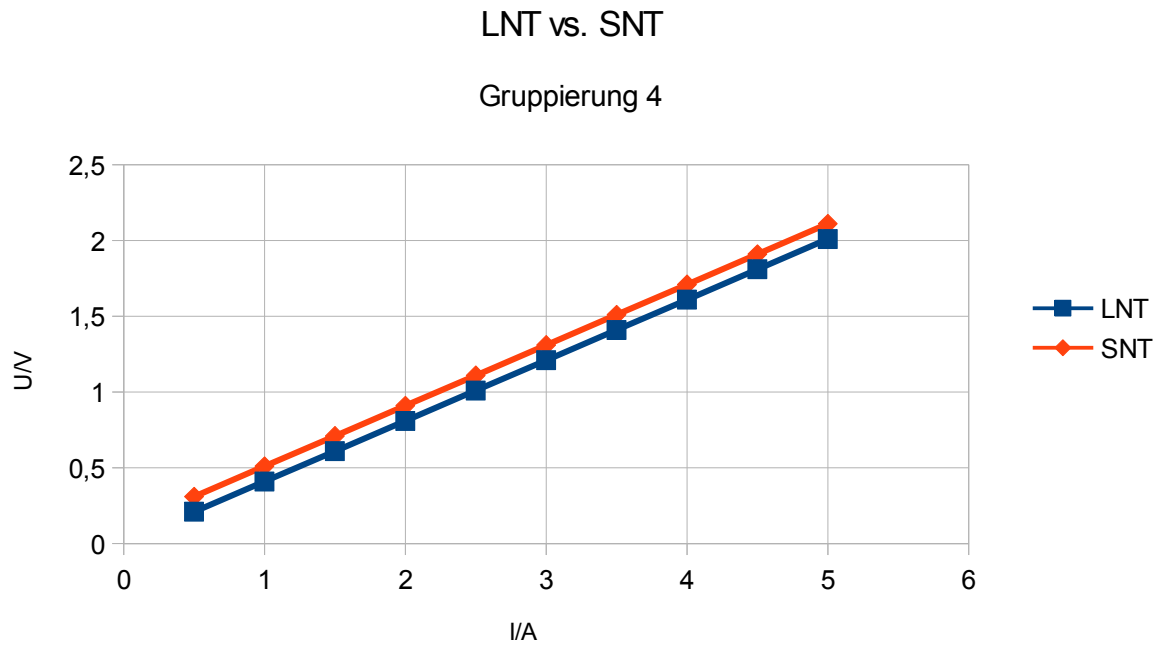


Abbildung 5.14: Strommessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 4 LNT vs. SNT

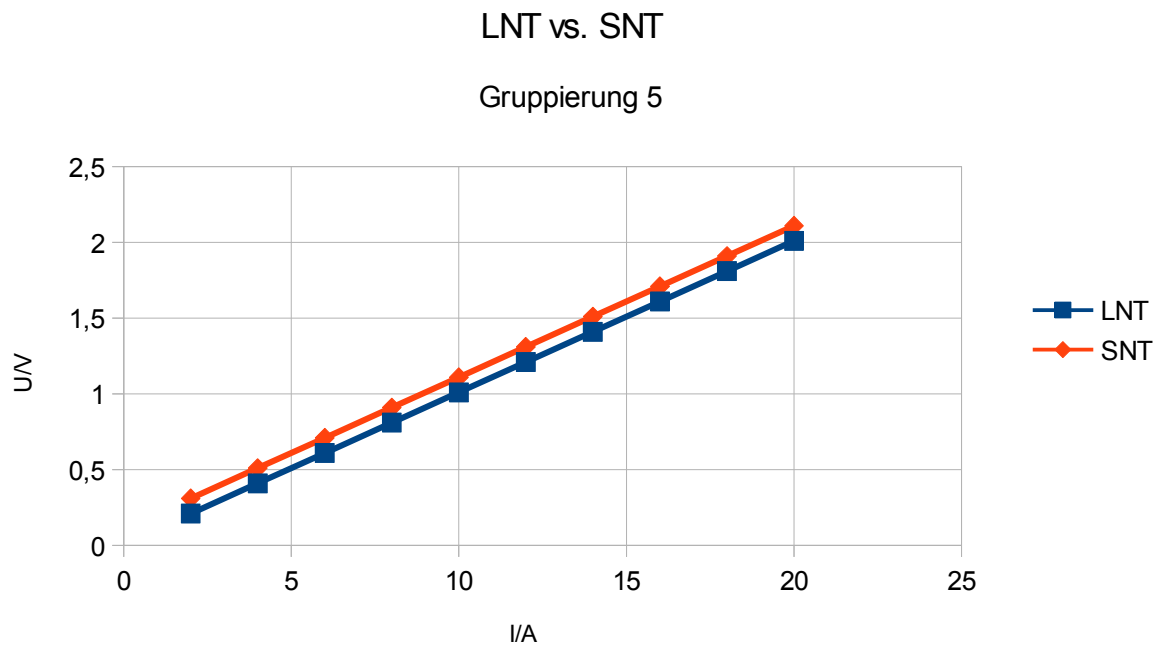


Abbildung 5.15: Strommessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 5 LNT vs. SNT



## 5 Messungen der Messumformer

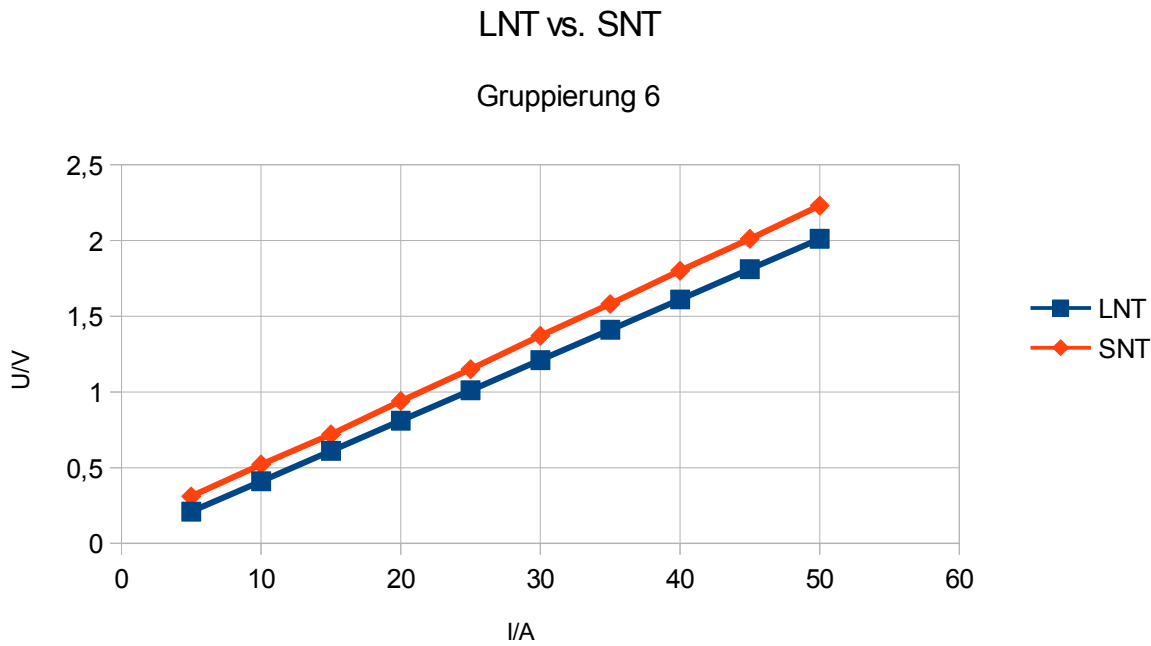


Abbildung 5.16: Strommessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 6 LNT vs. SNT

Messgrößen Übertragungsfaktor	Messergebnis Übertragungsfaktor	Messunsicherheit	Standard- abweichung
$K_{10}$	21,03	1,362	1,873
$K_{20}$	21,05	1,365	1,877
$K_{30}$	21,05	1,368	1,881
$K_{\text{syn}10}$	21,03	1,362	1,873
$K_{\text{syn}20}$	21,05	1,365	1,877
$K_{\text{syn}30}$	21,05	1,368	1,881
$K_{\text{excsyn}}$	2,181	0,163	0,224
$K_{\text{excmot}}$	2,180	0,162	0,223
$K_{\text{excgen}}$	8,724	0,653	0,897
KDC	21,03	1,362	1,873

Tabelle 5.2 Messergebnis und Messunsicherheit bzw. Standardabweichung für den Übertragungsfaktor der Strommessung der Schaltnetzteile

Grüner Balken ist das Messergebnis für den Übertragungsfaktor und die gelben Balken für die Messunsicherheit und Standardabweichung in der Calc Tabelle (s. Anhang 6)

### 5.3 Grenzfrequenzmessungen

Die Grenzfrequenzmessungen bei den Trennverstärkern wurde mit dem HAMEG Frequenzgenerator mit Signalverstärker durchgeführt

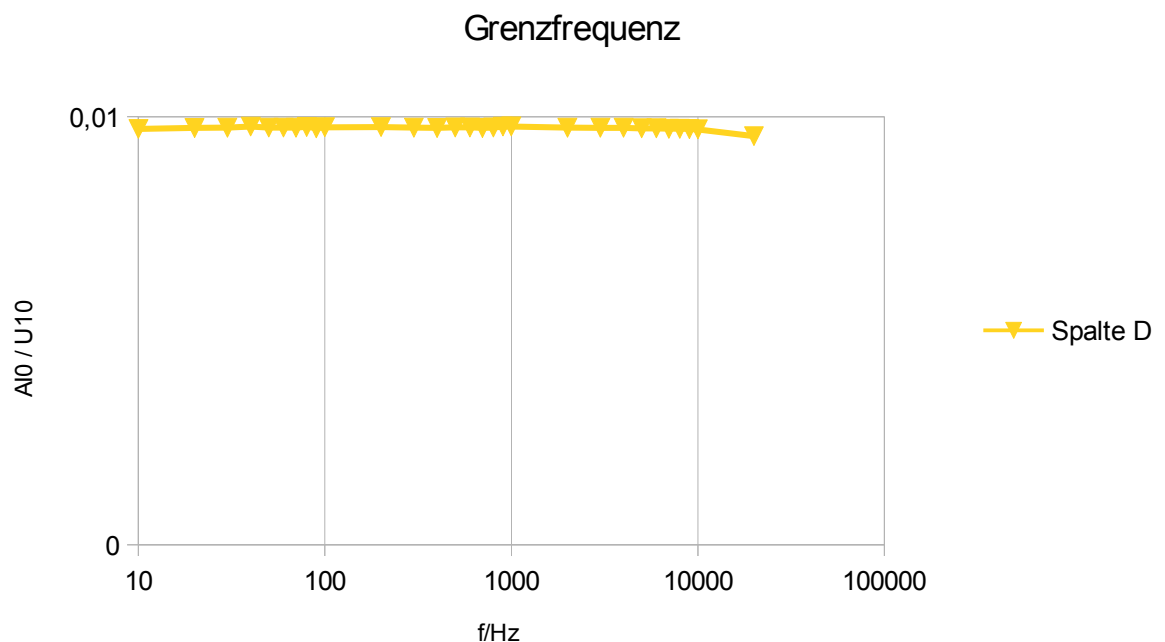
Bei dem Hallsensor ist der Toellner 7741 für die Frequenzmessung genutzt worden.

Messungen werden wie aus dem Kapitel davor verschaltet mit den Jeweiligen Frequenzgenerator als Quelle. Der Differenzastkopf wird nach wie vor für die Spannung am Eingang der Messgröße verwendet und gleiches gilt für den Strom mit dem Nullflusswandler.

#### 5.3.1 Messergebnisse

##### 5.3.1.1 Spannungs Grenzfrequenzmessung

Im Anhang 7 sind die Messwertetabellen aufgeführt.



Leider ist aus dieser Messung kaum ein Ergebnis zu beurteilen und muss hier als Fehlschlag definiert werden.

##### 5.3.1.2 Strom Grenzfrequenzmessung

Im Anhang 7 sind die Messwertetabellen aufgeführt.

## 5 Messungen der Messumformer

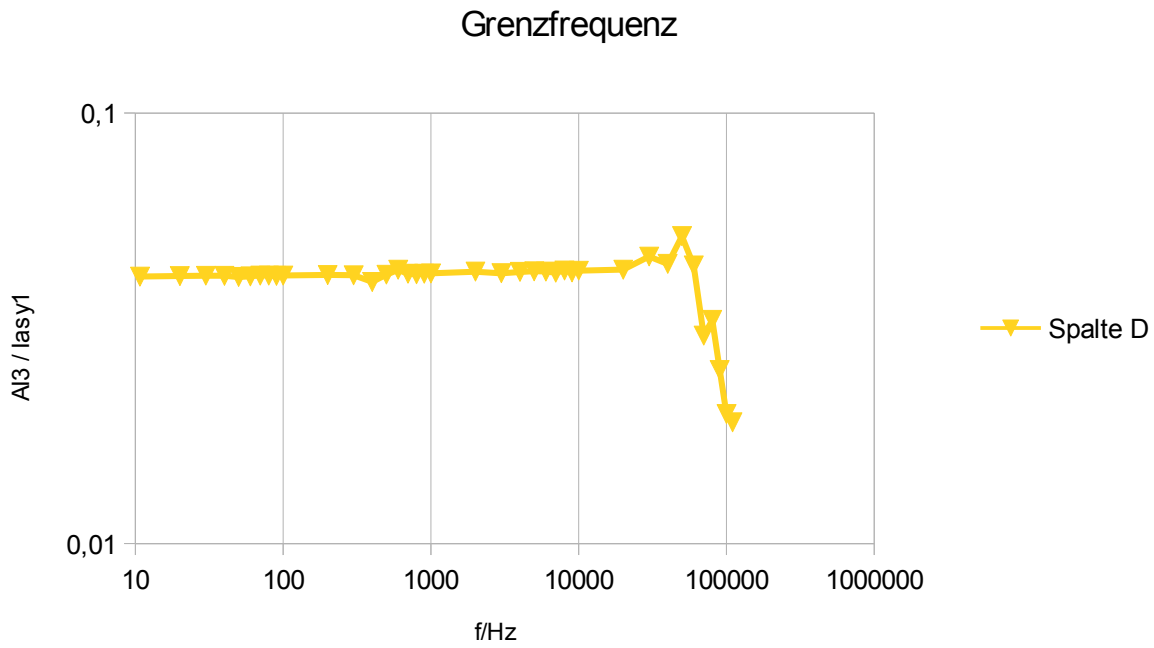


Abbildung 5.17: Stromgrenzfrequenzmessung

Dieses Ergebnis mit einer Grenzfrequenz von ca. 50kHz ist das was erwartet wurde erreicht.

### 6 Auswertung und Ausblick

Die Hardware für eine automatische Messdatenerfassung aller Messpunkte ist umgesetzt worden. Mit allen drei Messumformer Gehäusen ist der Synchrongenerator Messstand vollständig modernisiert. Anhand der Marktanalyse entstand die Idee, den teureren Hallsensor durch zwei günstigere zu ersetzen die man Parallel unterhalb und oberhalb der Leiterplatte verzinnt, was in dieser Form erst mal nicht geht. Die Grenzfrequenzmessungen für die Strommessung hat ihren wert von ca. 50kHz erfreulich erreicht. Dies ist leider bei der Grenzfrequenzmessung der Spannung nicht erfolgt. Daher ist an dieser stelle eine Grenzfrequenzmessung aller Messkanäle erforderlich. Dennoch ist der Übertragungsfaktor der Spannungsmessungen positiv ausgefallen. Diese erreichen eine ähnliche Linearität mit dem zugehörige Übertragungsfaktor, wie der Betriebsspannung Labornetzteil Referenz. Bei den Strommessungen ist dies nicht zu verzeichnen und unterliegen deutlich unterhalb des Labornetzteil. Trotz versuche die Versorgungsspannung nochmals zu verbessern, ist dies auf technische grenzen gestoßen und es konnte keine weitere Verbesserung durchgeführt werden. Es ist davon auszugehen, das die Schaltnetzteile bei zu geringer Last einen schlechten Wirkungsgrad vergeben und somit dies auf die Betriebsspannungen der Sensoren Auswirkungen hat.

Die Arbeit mit den Messumformer ist noch nicht beendet und somit sind noch weitere Arbeiten in dem Bereich Grenzfrequenzmessungen, Korrektornetzwerke und Schaltnetzteil bzw. Betriebsspannungen anzubieten.

# I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Hauptstromkreislaufplan für den bestehenden Messstand mit analogen Zeigermessgeräten.....	4
Abbildung 2.2: Leistungsschilder mit Kenndaten der elektrischen Maschinen M1 bis M4.....	5
Abbildung 2.3: Messschaltung bzw. Hauptstromkreislaufplan der Messeinrichtung für Messdatenerfassung.....	9
Abbildung 2.4: Struktur der Elektrischen Messeinrichtung des Hauptstromkreislaufplan (Soll Zustand).....	10
Abbildung 2.5: Erdschleifenbildung bzw. Massenschleifenbildung infolge Mehrfacherdung [3].....	13
Abbildung 3.1: Einfacher Stromkreis mit einem Shuntwiderstand zur Messung von Strom.....	15
Abbildung 3.2: Einfacher Stromkreis mit einer Hallsonde zur Messung von Strom.....	16
Abbildung 3.3: Prinzipieller Aufbau eines Übertrages [4].....	17
Abbildung 3.4: Aufbau des Optokopplers mit dem LED-Durchlaßstrom IF [5].	18
Abbildung 3.5: Zur Erläuterung des Optokopplers ist a) links Einfacher Stromkreis mit dem Vorwiderstand, Widerstand R und den Messpunkt 1-2 für einen Optokoppler. b) Rechts ist die Schaltung des Optokopplers für die LED-Fototransistor Ausführung dargestellt mit den jeweiligen Strom- und Spannungsgrößen und dem Basisfaktor B dargestellt.....	18
Abbildung 4.1: Functional diagram HCNR-200.....	21
Abbildung 4.2: Functional diagram HCPL-7840.....	21
Abbildung 4.3: Typical Application L18P***12.....	22
Abbildung 4.4: Typical Application mit a) ACS756- und b) ACS712-Serie.....	22
Abbildung 4.5: Farnell vs. DigiKey in Abhängigkeit der Sensoren (Marktanalyse höherer Bestellmenge), Datum 07.10.2013.....	24
Abbildung 4.6: Figure 18 Empfohlene Schaltung aus dem Datenblatt bearbeitet.....	26
Abbildung 4.7: Blockdiagramm der Messkanäle für die Gruppierung 1.....	28
Abbildung 4.8: Blockdiagramm der Messkanäle für die Gruppierung 2.....	28
Abbildung 4.9: Blockdiagramme der Messkanäle für die Gruppierungen 3 bis 6.....	29
Abbildung 4.10: Spannungsteiler.....	29
Abbildung 4.11: Zur Erläuterung der Schaltungen Schaltplan Gruppierung 6..	33
Abbildung 4.12: Sensor Symbole für a) Trennverstärker HCPL-7840, b) Hallsensor ACS756-50 und c) Hallsensoren ACS712.....	34
Abbildung 4.13: Spannungsteiler Beispiel der Gruppierung 6.....	34
Abbildung 4.14: Tiefpassfilter der Gruppierung 6 mit einer einer Veränderung.....	35
Abbildung 4.15: Versorgungsspannung der Gruppierungen 1 und 2.....	35
Abbildung 4.16: Versorgungsspannung der Gruppierungen 3 bis 6.....	35
Abbildung 4.17: Platinenlayout Vorderseite des a) Padfläche für den Strom, b) Spannungsteilers und Lötaugen mit 19mm Abstand.....	36
Abbildung 4.18: Platinenlayout Siebdruck Teilauszug.....	37

Abbildung 4.19: PCB-Layout Vorderseite (top) der Gruppierungen 1 und 2....	39
Abbildung 4.20: PCB-Layout Rückseite (bottom) der Gruppierungen 1 und 2.	40
Abbildung 4.21: Blockschaltung der Hilfsenergie mit + oder - 5V/8W und Klemmen für Gruppierungen 1 und 2 im Gehäuse.....	41
Abbildung 4.22: Blockschaltung der Hilfsenergie mit + oder - 5V/8W und Klemmen für Gruppierungen 3 bis 6 im Gehäuse.....	42
Abbildung 4.23: Linkes Bild zeigt die Messumformer Gruppierungen 3 bis 6, rechts weit außen die Messumformer Gruppierung 1 und in der Mitte die Messumformer Gruppierung 2.....	42
Abbildung 5.1: Störsignal am Messsignal durch Schaltnetzteil.....	43
Abbildung 5.2: ElKo Anschluss an X12 Reihenklemme.....	43
Abbildung 5.3: Messsignal UAI mit ElKo C entspricht 47 $\mu$ F.....	44
Abbildung 5.4: Messsignal UAI mit ElKo C entspricht 470 $\mu$ F.....	44
Abbildung 5.5: Messsignal UAI mit ElKo C entspricht 4700 $\mu$ F.....	44
Abbildung 5.6: Schaltbild für die Übertragung der Spannung UX oder des Stromes IX zu dem Messsignal UAI X.....	45
Abbildung 5.7: Spannungsmessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 1 und 2 LNT vs. SNT.....	46
Abbildung 5.8: Spannungsmessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 3 LNT vs. SNT.....	47
Abbildung 5.9: Spannungsmessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 4 LNT vs. SNT.....	47
Abbildung 5.10: Spannungsmessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 5 LNT vs. SNT.....	48
Abbildung 5.11: Spannungsmessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 6 LNT vs. SNT.....	48
Abbildung 5.12: Strommessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 1 und 2 LNT vs. SNT.....	50
Abbildung 5.13: Strommessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 3 LNT vs. SNT.....	50
Abbildung 5.14: Strommessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 4 LNT vs. SNT.....	51
Abbildung 5.15: Strommessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 5 LNT vs. SNT.....	51
Abbildung 5.16: Strommessung Übertragungsfaktor Gruppierungen 6 LNT vs. SNT.....	52
Abbildung 5.17: Stromgrenzfrequenzmessung.....	54
Abbildung 1.1: HCNR200 erste Seite.....	67
Abbildung 1.2: HCNR Figure 18 für Bipolar Schaltung.....	68
Abbildung 1.3: HCNR200 Figure 20, Spice Model.....	69
Abbildung 1.4: Ratings der SMD Widerstände.....	70
Abbildung 1.5: Power Rating der SMD Widerstände.....	70
Abbildung 3.1: Hierarchieplan für den Schaltplan der Gruppierungen 3 bis 6, mit Globalen Labels und erste Seite.....	73
Abbildung 3.2: Schaltplan der Gruppierung 3 bis 6, mit der Versorgungsspannung und zweite Seite.....	74
Abbildung 3.3: Schaltplan der Gruppierungen 3 bis 5, mit den Sensoren und	

Seite 3.....	75
Abbildung 3.4: Schaltplan der Gruppierungen 6, mit Sensoren und Seite 3....	76
Abbildung 3.5: Schaltplan der Gruppierungen 1 und 2.....	77
Abbildung 4.1: PCB-Layout Vorderseite (top) der Gruppierungen 3 bis 6.....	78
Abbildung 4.2: PCB-Layout Rückseite (bottom) der Gruppierungen 3 bis 6....	79
Abbildung 4.3: PCB-Layout Siebdruck der Gruppierungen 3 bis 6.....	80
Abbildung 4.4: PCB-Layout Vorderseite (top) der Gruppierungen 1 und 2.....	81
Abbildung 4.5: PCB-Layout Rückseite (bottom) der Gruppierungen 1 und 2...	82
Abbildung 4.6: PCB-Layout Siebdruck der Gruppierungen 1 und 2.....	83

## II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Messgrößentabelle aus den Kenndaten Leistungsschilder der gelagerten elektrischen Maschinen.....	7
Tabelle 2.2 Leistungskenndaten der Analog/Digital Wandler-Karte.....	11
Tabelle 2.3 Vergleich der Hilfsenergie.....	14
Tabelle 3.1 Pro-Contra des Shunt gegenüber der Hallsonde.....	16
Tabelle 3.2 Pro-Contra des Übertrager gegenüber dem Optokoppler.....	19
Tabelle 4.1: Marktanalyse der Distributoren bei einmaliger Bestellung und Zuweisungen der Messgrößen und ihren Sensoren.....	24
Tabelle 4.2: Spannungsteiler mit 6 fachen Vorwiderstandswert RVOR , dessen einzelne Verlustleistungen PV und Spannungsabfall am Widerstandsteiler UT.	31
Tabelle 4.3: Übertragungsfaktoren der Messgrößen für Normal, Minimal und Maximal wert.....	33
Tabelle 4.4 Pro-Contra Platinen Einbau im Gehäuseboden oder am -Deckel....	37
Tabelle 5.1 Messergebnis und Messunsicherheit bzw. Standardabweichung für den Übertragungsfaktor der Spannungsmessung der Schaltnetzteile.....	49
Tabelle 5.2 Messergebnis und Messunsicherheit bzw. Standardabweichung für den Übertragungsfaktor der Strommessung der Schaltnetzteile.....	52
Tabelle 2.1: Marktanalysen Berechnungen für die Distributoren Farnell und DigiKey mit den erforderlichen Sensoren.....	72



### **III. Literaturverzeichnis**

2: Mustu Sertac, ,, ,2013

6: Heinz Meckbach, Elektrische Maschinen,, ,2012

3: Reinhar Lerch, Elektrische Messtechnik, Springer-Verlag, ,2004

4: Thomas Mühl, Einführung in die elektrische Messtechnik, Teubner-Verlag, ,  
2006

## Anhang

# 1 Datenblätter

## **1.1 Hallsonde ACS756**

## **1.2 Hallsonde ACS712**

### **1.3 Hallsonde L18P\*\*\*12**

## **1.4 Trennverstärker HCPL-7840**

## 1.5 Teilauszug Optokoppler HCNR-200

### 1.5.1 Seite 1 Description und Applications

#### Description

The HCNR200/201 high-linearity analog optocoupler consists of a high-performance AlGaAs LED that illuminates two closely matched photodiodes. The input photodiode can be used to monitor, and therefore stabilize, the light output of the LED. As a result, the non-linearity and drift characteristics of the LED can be virtually eliminated. The output photodiode produces a photocurrent that is linearly related to the light output of the LED. The close matching of the photo-diodes and advanced design of the package ensure the high linearity and stable gain characteristics of the optocoupler.

The HCNR200/201 can be used to isolate analog signals in a wide variety of applications that require good stability, linearity, bandwidth and low cost. The HCNR200/201 is very flexible and, by appropriate design of the application circuit, is capable of operating in many different modes, including: unipolar/bipolar, ac/dc and inverting/non-inverting. The HCNR200/201 is an excellent solution for many analog isolation problems.

#### Schematic

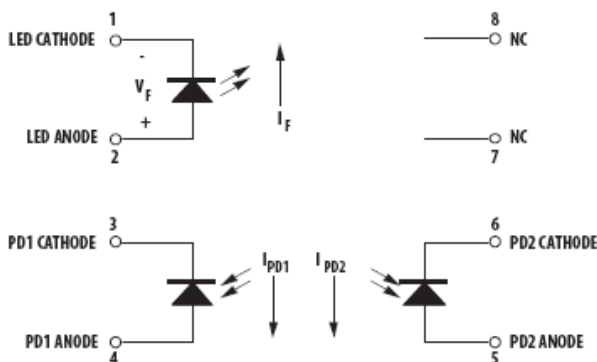


Abbildung 1.1: HCNR200 erste Seite

#### Features

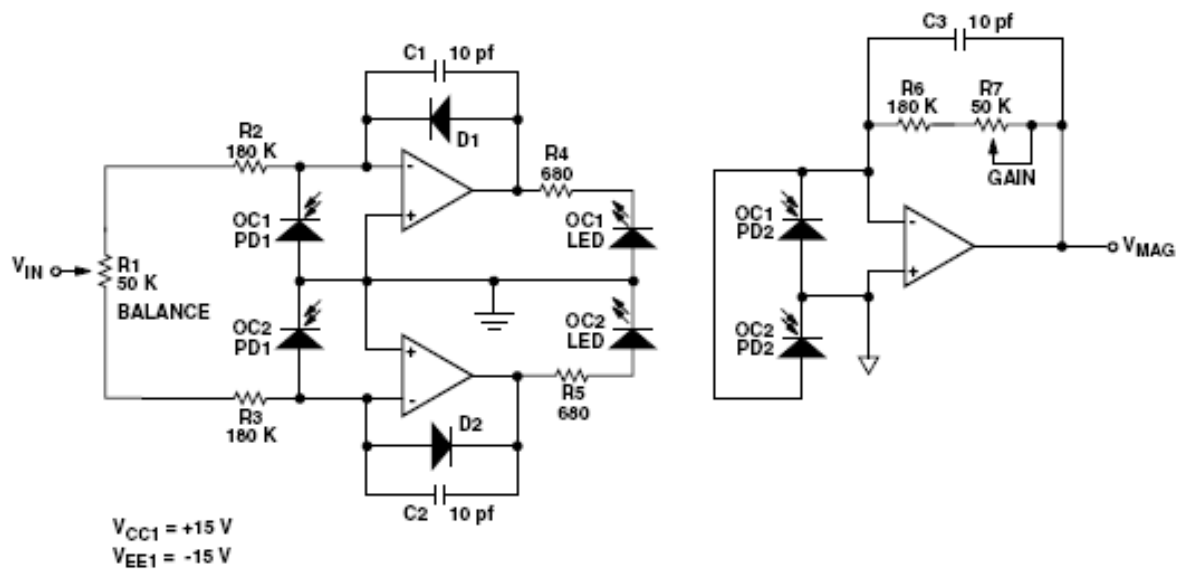
- Low nonlinearity: 0.01%
- $K_3 (I_{PD2}/I_{PD1})$  transfer gain  
HCNR200:  $\pm 15\%$   
HCNR201:  $\pm 5\%$
- Low gain temperature coefficient:  $-65 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$
- Wide bandwidth – DC to  $>1 \text{ MHz}$
- Worldwide safety approval
  - UL 1577 recognized (5 kV rms/1 min rating)
  - CSA approved
  - IEC/EN/DIN EN 60747-5-2 approved  
 $V_{IORM} = 1414 \text{ V}_{\text{peak}}$  (option #050)
- Surface mount option available (Option #300)
- 8-Pin DIP package - 0.400" spacing
- Allows flexible circuit design

#### Applications

- Low cost analog isolation
- Telecom: Modem, PBX
- Industrial process control:
  - Transducer isolator
  - Isolator for thermocouples 4 mA to 20 mA loop isolation
- SMPS feedback loop, SMPS feedforward
- Monitor motor supply voltage
- Medical



## 1.5.2 Seite 13 Figure 18. Bipolar isolation amplifier



**Figure 18. Bipolar isolation amplifier.**

Abbildung 1.2: HCNR Figure 18 für Bipolar Schaltung

- mit 2 Optokoppler für +/- 15 V Eingangssignal und +/- 15 V für die 3 Operationsverstärker

### 1.5.3 Seite 14 Quellcode Spicemodel für Ltspice

```

*HCNR200 Linear Optocoupler SPICE Model
*
*           LED Cathode
*           LED Anode
*           PD1 Cathode
*           PD1 Anode
*           PD2 Anode
*           PD2 Cathode
*
*SUBCKT HCNR200 1 2 3 4 5 6

* LED circuit
QLED1 8 2 7 QCPL .5
QLED2 9 2 7 QCPL .5
VLED 7 1 DC .685
VPD1 8 1 DC 2
VPD2 9 1 DC 2

* Input photodiode circuit
DPD1 4 3 DPHOTO
FPD1 3 4 VPD1 -1
CPD1 4 3 8P

* Output photodiode circuit
DPD2 5 6 DPHOTO
FPD2 6 5 VPD2 -1
CPD2 5 6 8P

* Photodiode model
.MODEL DPHOTO D(IS=4.5E-12 RS=150 N=1.3 XTI=4 EG=1.11
+ CJO=14P M=1.96 VJ=1.9)

* LED/Optical-coupling transistor model
.model QCPL NPN(IS=2.214E-19 BF=10m NF=1.010 IKF=11.00m ISE=1.167P
+ NE=1.737 RB=3.469 VAF=100 TF=1.77U CJE=80P)

.ENDS

```

Figure 20. SPICE model listing.

Abbildung 1.3: HCNR200 Figure 20, Spice Model

## 1.6 Teilauszüge Widerstandskit 0805

### 1.6.1 Ratings und Power Ratings

Ratings:

Type	RMC 0805
Power Rating	0.1 W
Maximum Working Voltage	150 V
Maximum Overload Voltage	300 V
Temperature Range	-55°C +125°C
Ambient Temperature	70°C

Abbildung 1.4: Ratings der SMD Widerstände

#### Power Rating

Type	Power Rating at 70°C (W)	Tolerance %	Standard Series
RMC 0805	0.1	±1	E-24

Abbildung 1.5: Power Rating der SMD Widerstände

## **1.7 Fibox Gehäuse CAB**

## 2 Tabellarische Berechnungen für die Marktanalyse

	Farnell					DigiKey		Differenz
	Anzahl	Einzelpreis	Gesamtpreis	12% Rabatt			Gesamtpreis	Farnell – Digi-Key
HCPL-7840 (Farnell)	1	5,99000 €	5,99000 €	5,27120 €	HCPL-7840 (DigiKey)	5,60000 €	5,60000 €	-0,32880 €
	10	5,99000 €	59,90000 €	52,71200 €		5,03500 €	50,35000 €	2,36200 €
	25	5,99000 €	149,75000 €	131,78000 €		4,58760 €	114,69000 €	17,09000 €
	50	5,99000 €	299,50000 €	263,56000 €		5,58760 €	279,38000 €	-15,82000 €
	100	4,53000 €	453,00000 €	398,64000 €		4,13970 €	413,97000 €	-15,33000 €
	250	3,96000 €	990,00000 €	871,20000 €		3,80408 €	951,02000 €	-79,82000 €
	500	3,89000 €	1.945,00000 €	1.711,60000 €		3,46842 €	1.734,21000 €	-22,61000 €
ACS756 (Farnell)	1	7,52000 €	7,52000 €	6,61760 €	ACS756 (DigiKey)	5,21000 €	5,21000 €	1,40760 €
	10	7,52000 €	75,20000 €	66,17600 €		4,10800 €	41,08000 €	25,09600 €
	25	5,97000 €	149,25000 €	131,34000 €		4,10800 €	102,70000 €	28,64000 €
	50	5,97000 €	298,50000 €	262,68000 €		3,37740 €	168,87000 €	93,81000 €
	100	5,01000 €	501,00000 €	440,88000 €		2,92100 €	292,10000 €	148,78000 €
	250	5,01000 €	1.252,50000 €	1.102,20000 €		2,82968 €	707,42000 €	394,78000 €
	500	4,48000 €	2.240,00000 €	1.971,20000 €		2,73840 €	1.369,20000 €	602,00000 €
ACS712-20A (Farnell)	1	4,14000 €	4,14000 €	3,64320 €	ACS712-20A (DigiKey)	3,47000 €	3,47000 €	0,17320 €
	10	2,37000 €	23,70000 €	20,85600 €		2,70200 €	27,02000 €	-6,16400 €
	25	2,37000 €	59,25000 €	52,14000 €		3,70200 €	92,55000 €	-40,41000 €
	50	2,37000 €	118,50000 €	104,28000 €		1,93780 €	96,89000 €	7,39000 €
	100	2,11000 €	211,00000 €	185,68000 €		1,88680 €	188,68000 €	-3,00000 €
	250	1,92000 €	480,00000 €	422,40000 €		1,73384 €	433,46000 €	-11,06000 €
	500	1,87000 €	935,00000 €	822,80000 €		1,58082 €	790,41000 €	32,39000 €
ACS712-05A (Farnell)	1	3,91000 €	3,91000 €	3,44080 €	ACS712-05A (DigiKey)	3,47000 €	3,47000 €	-0,02920 €
	10	3,91000 €	39,10000 €	34,40800 €		2,70200 €	27,02000 €	7,38800 €
	25	2,38000 €	59,50000 €	52,36000 €		2,70200 €	67,55000 €	-15,19000 €
	50	2,38000 €	119,00000 €	104,72000 €		1,93780 €	96,89000 €	7,83000 €
	100	2,11000 €	211,00000 €	185,68000 €		1,88680 €	188,68000 €	-3,00000 €
	250	1,92000 €	480,00000 €	422,40000 €		1,73384 €	433,46000 €	-11,06000 €
	500	1,87000 €	935,00000 €	822,80000 €		1,58082 €	790,41000 €	32,39000 €

Tabelle 2.1: Marktanalysen Berechnungen für die Distributoren Farnell und DigiKey mit den erforderlichen Sensoren

### 3 KiCad Schaltpläne

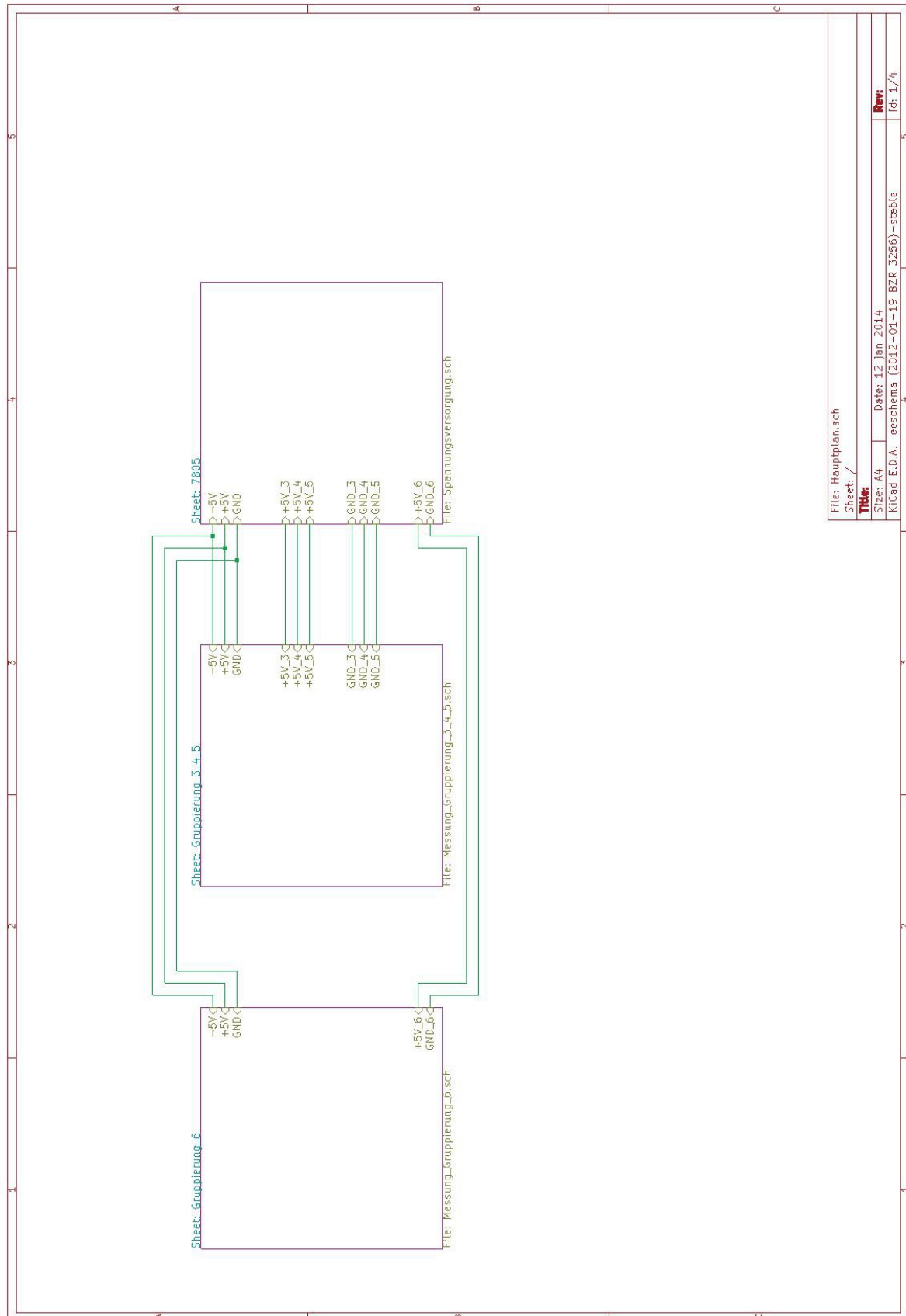
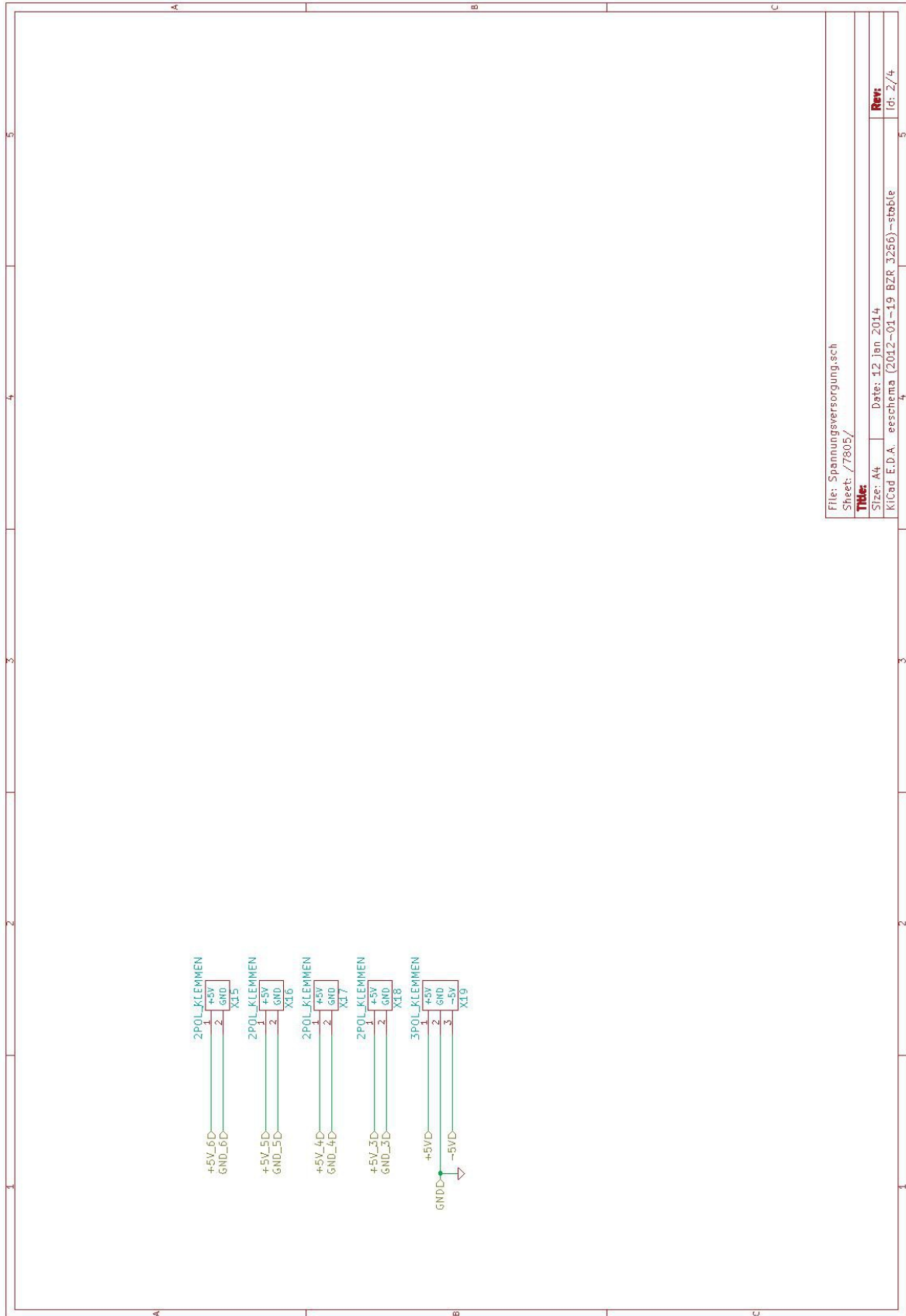
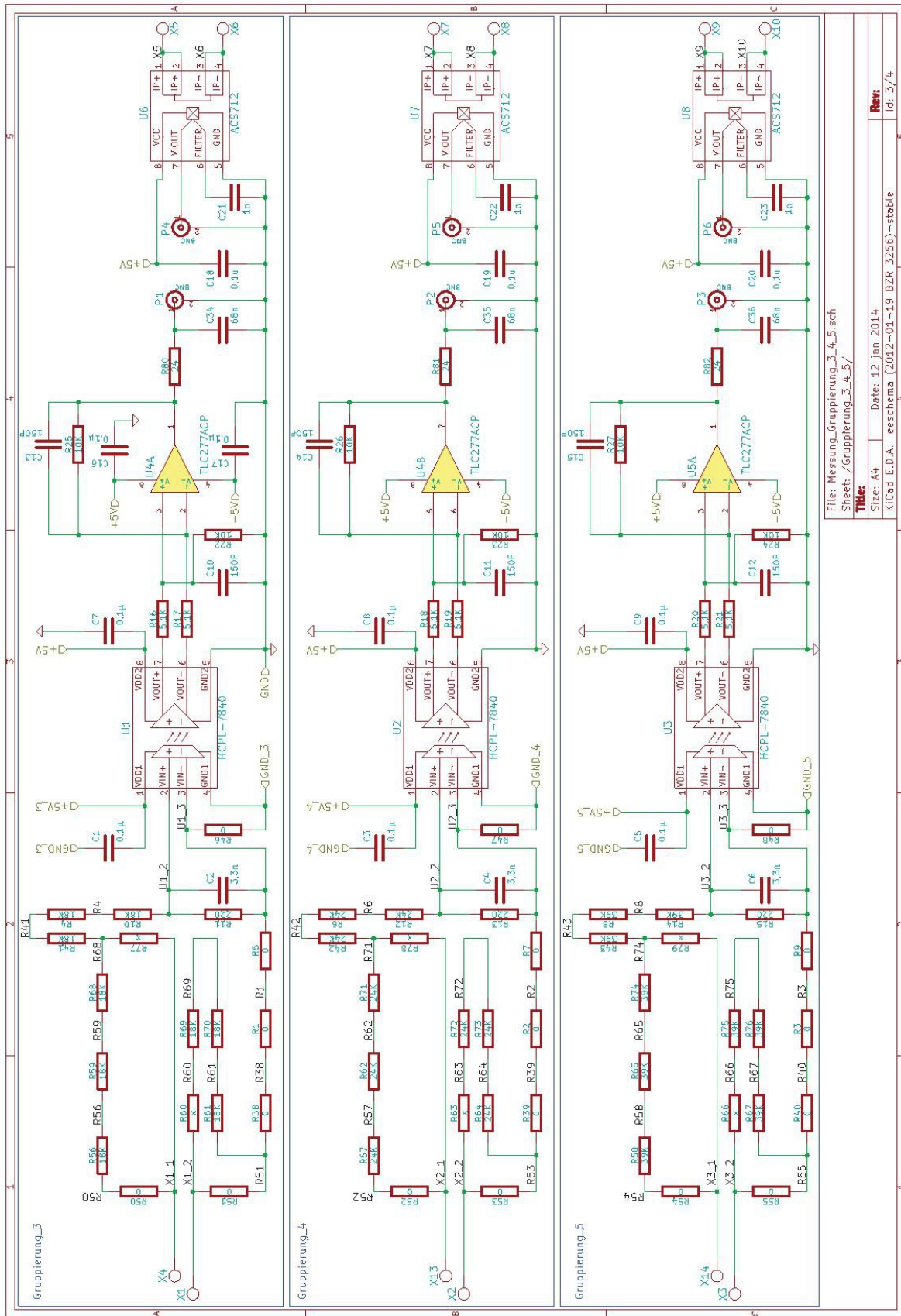


Abbildung 3.1: Hierarchieplan für den Schaltplan der Gruppierungen 3 bis 6, mit Globalen Labels und erste Seite



File: Spannungsversorgung.sch	
Sheet: /7805/	
<b>Title:</b>	
Size: A4	Date: 12 Jan 2014
KiCad E.D.A.	eeschema (2012-01-19 BZR 3266)-stable
	Id: 2/4

Abbildung 3.2: Schaltplan der Gruppierung 3 bis 6, mit der Versorgungsspannung und zweite Seite

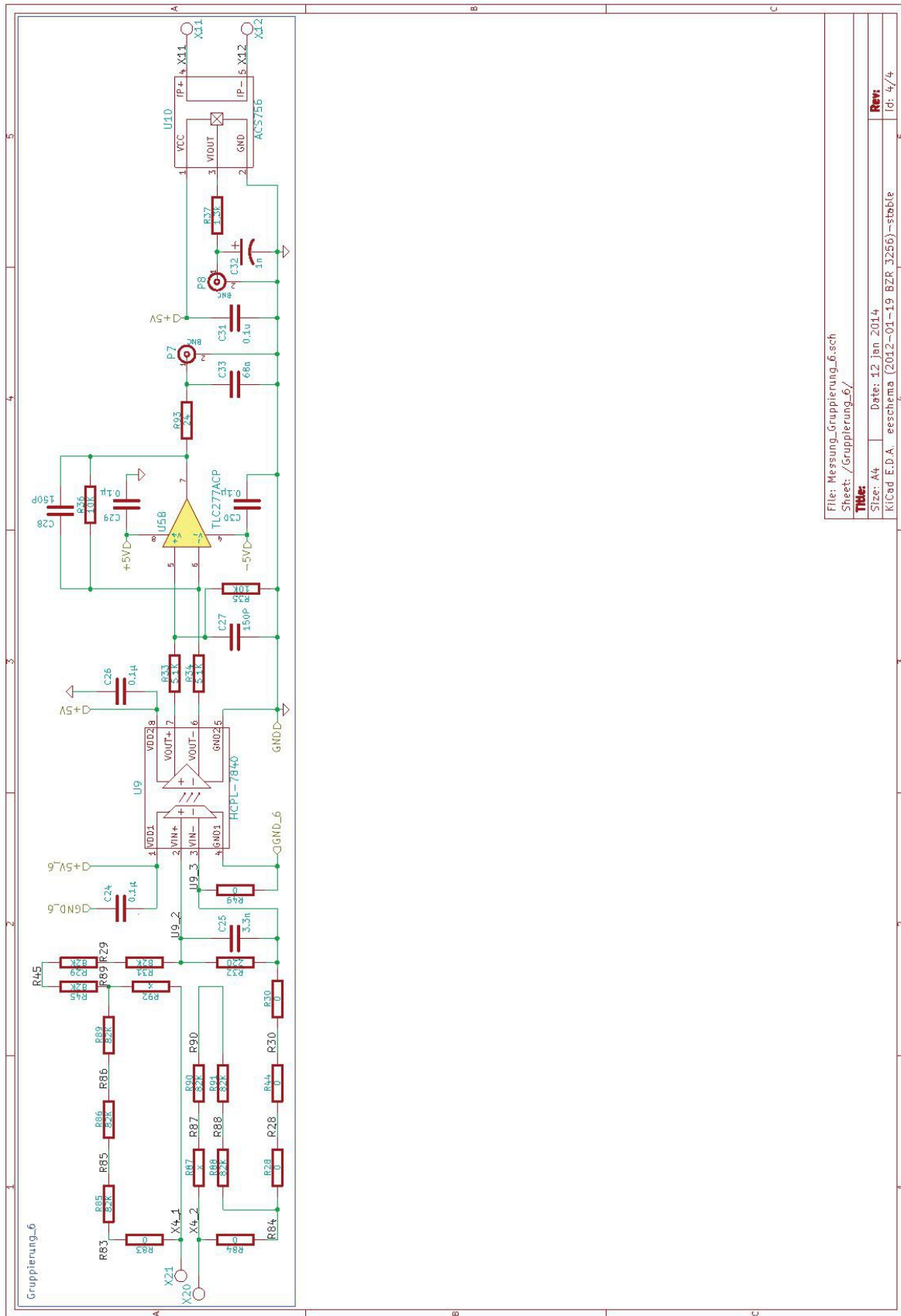


File: Messung\_Gruppierung\_3\_4\_5.sch  
 Sheet: /Gruppierung\_3\_4\_5/

<b>Time:</b>	
Size: A4	Date: 12 Jan 2014
KiCad E.D.A. eeschema (2012-01-19 BZR 3256)-stable	
	Id: 3/4

Abbildung 3.3: Schaltplan der Gruppierungen 3 bis 5, mit den Sensoren und Seite 3





File: Messung_Gruppierung_6.sch	
Sheet: /Gruppierung_6/	
<b>Time:</b>	
Size: A4	Date: 12 Jan 2014
KiCad E.D.A.	eesschema (2012-01-19 BZR 3266)-stable
	<b>Rev:</b>
	Id: 4/4

Abbildung 3.4: Schaltplan der Gruppierungen 6, mit Sensoren und Seite 3

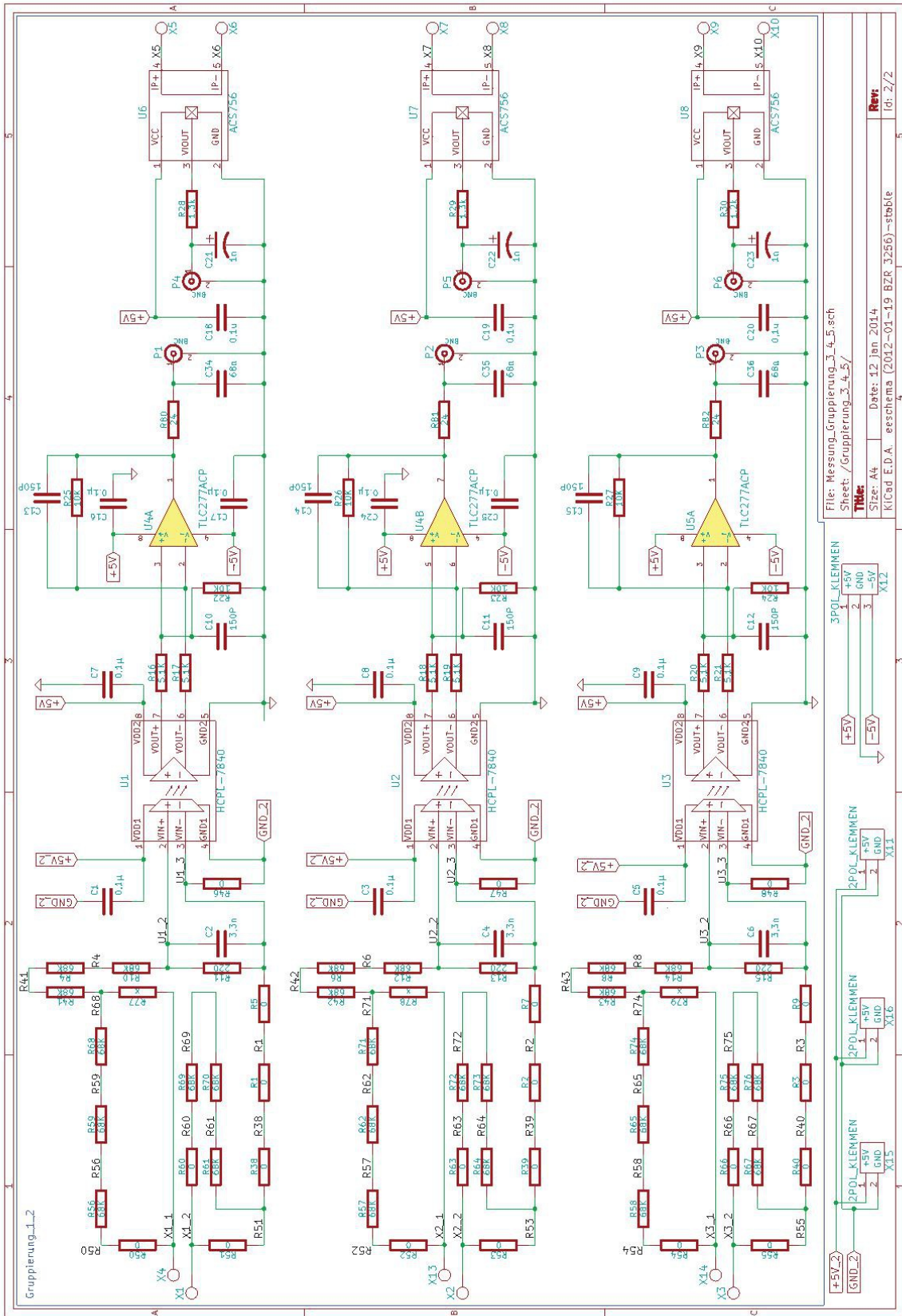


Abbildung 3.5: Schaltplan der Gruppierungen 1 und 2

## 4 KiCad Platinenlayouts

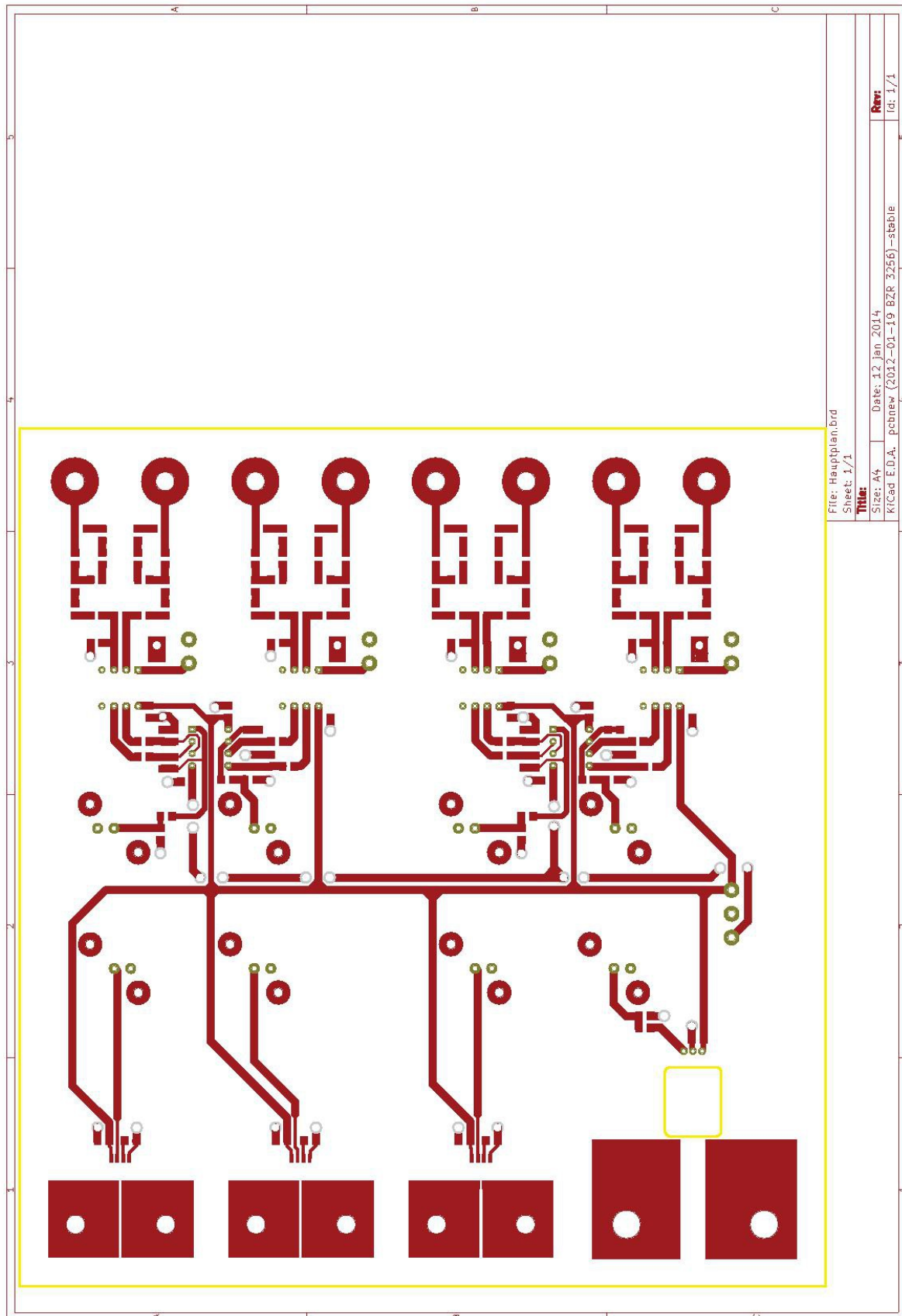


Abbildung 4.1: PCB-Layout Vorderseite (top) der Gruppierungen 3 bis 6

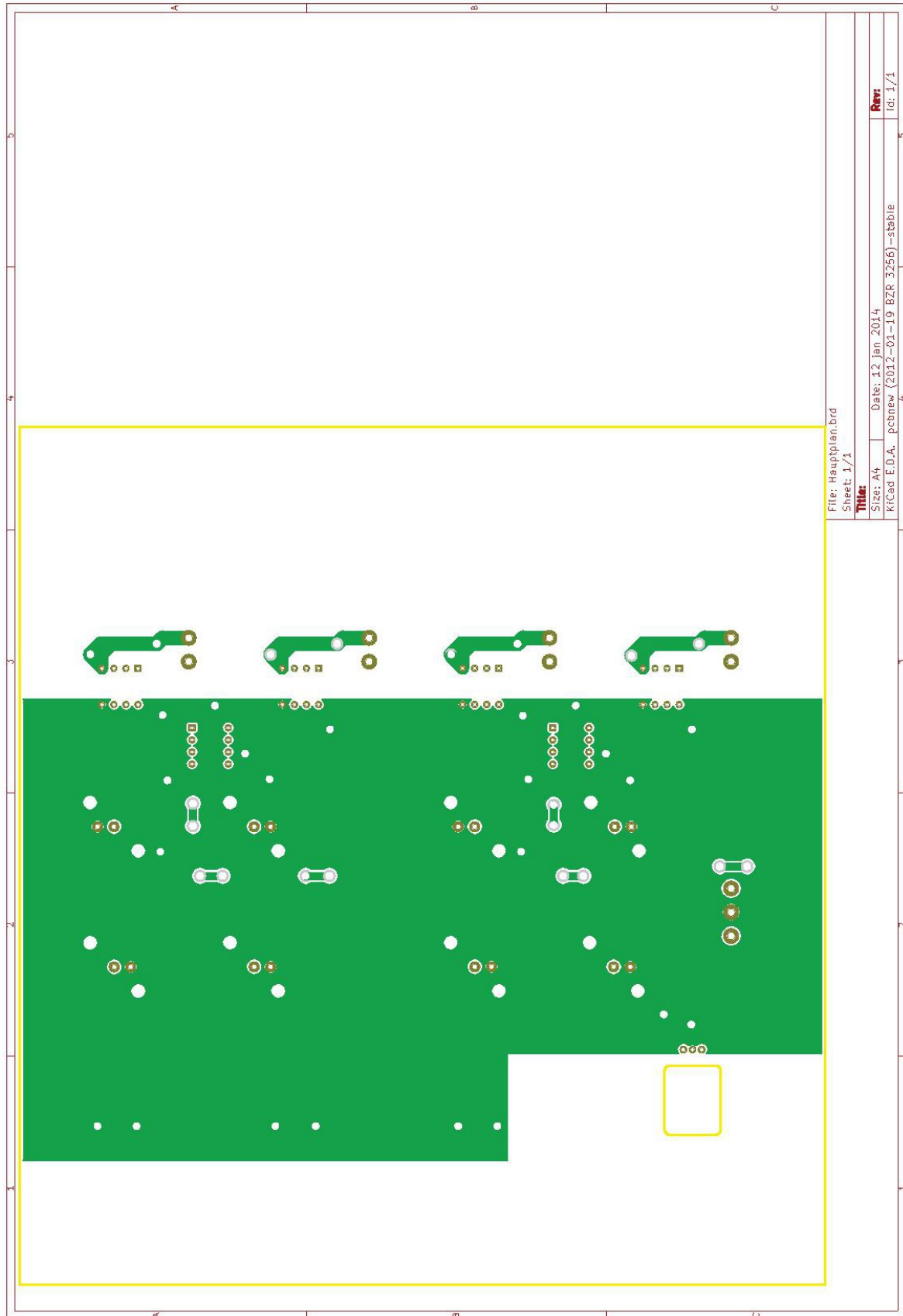


Abbildung 4.2: PCB-Layout Rückseite (bottom) der Gruppierungen 3 bis 6

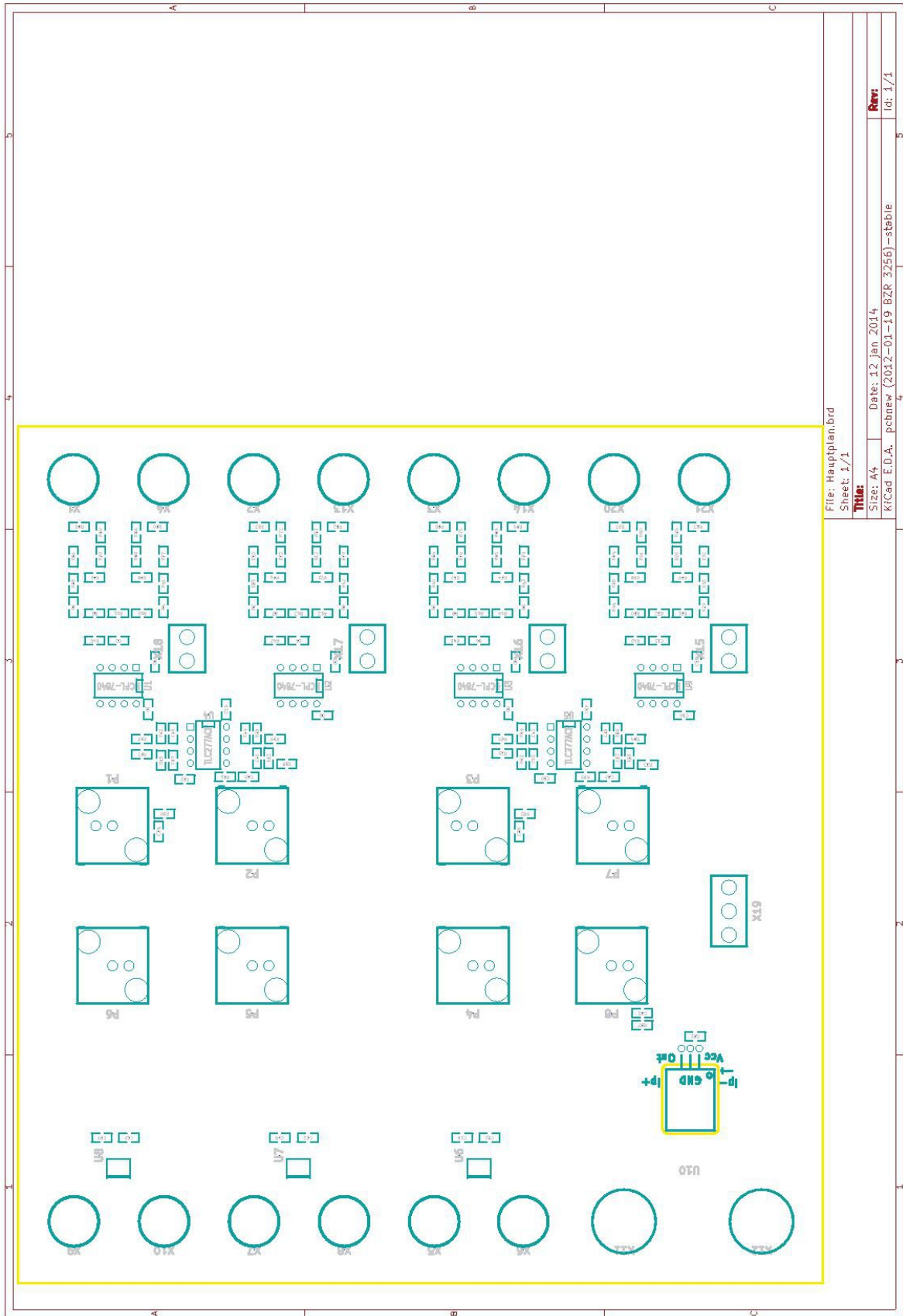


Abbildung 4.3: PCB-Layout Siebdruck der Gruppierungen 3 bis 6

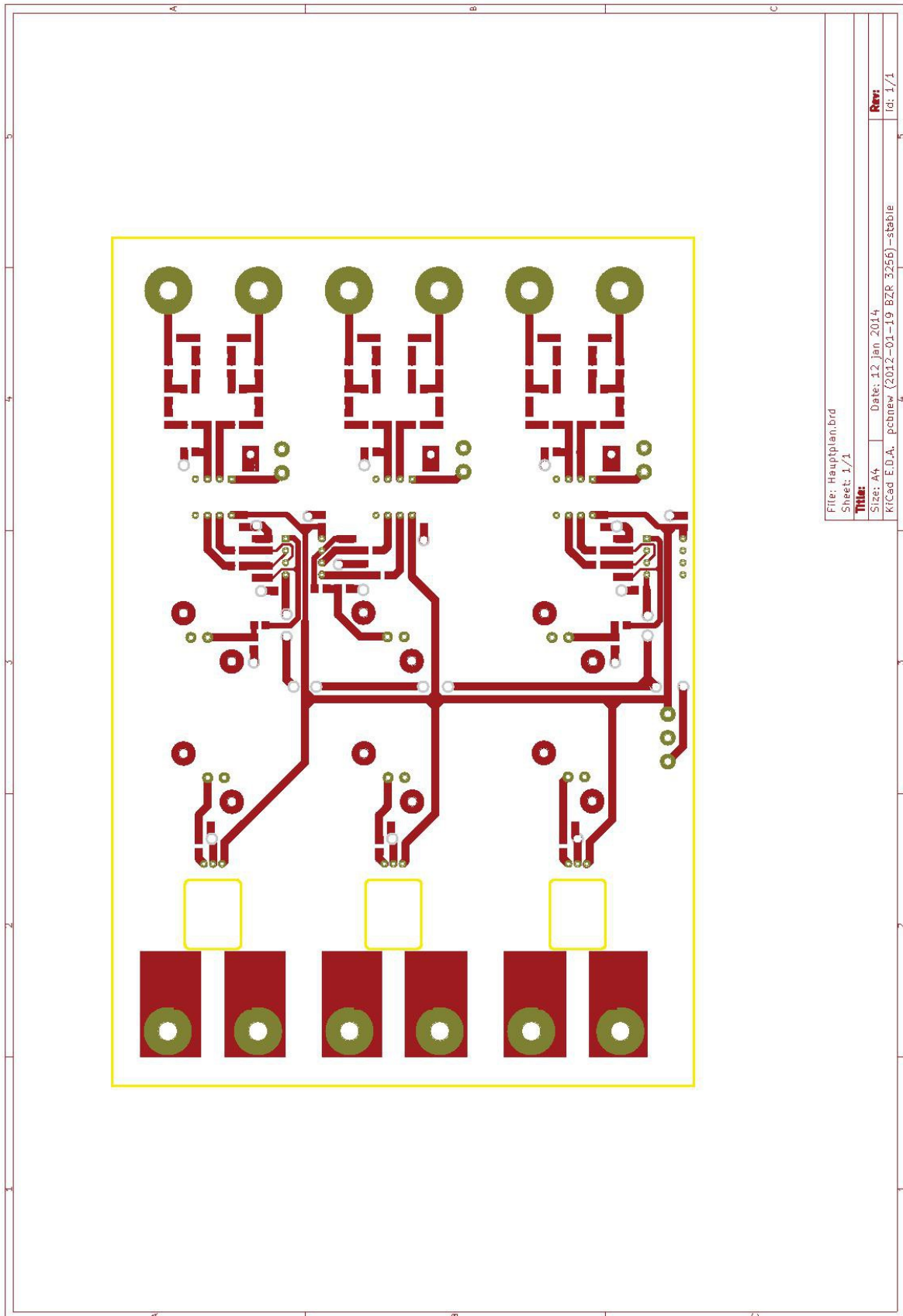


Abbildung 4.4: PCB-Layout Vorderseite (top) der Gruppierungen 1 und 2

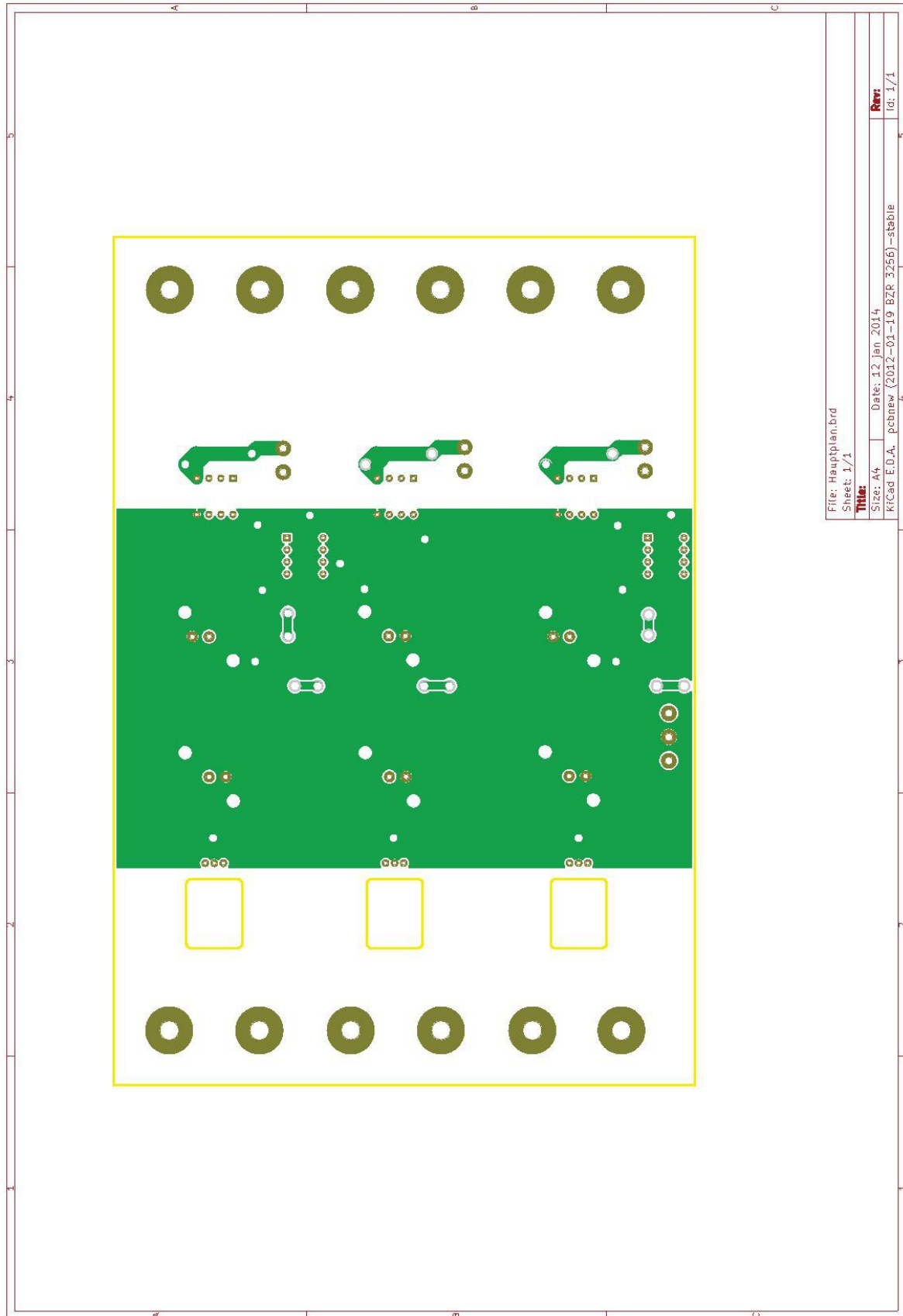


Abbildung 4.5: PCB-Layout Rückseite (bottom) der Gruppierungen 1 und 2

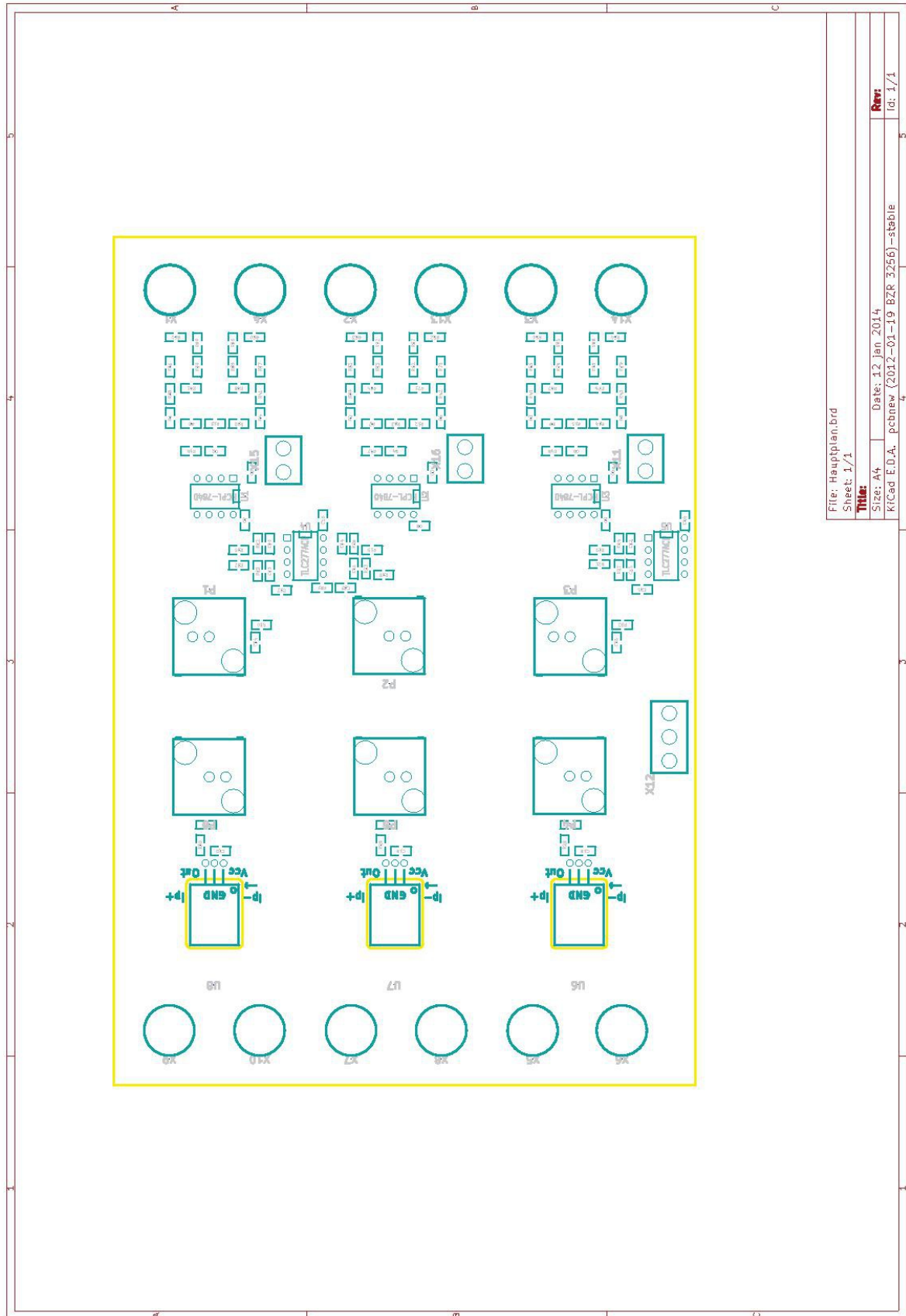


Abbildung 4.6: PCB-Layout Siebdruck der Gruppierungen 1 und 2



## **5 Messwertetabelle Spannungsmessungen**

## **6 Messwertetabelle Strommessungen**

## **7 Messwertetabelle Frequenzmessungen**