

# Advanced Electronics – HS23

Rogowskispule



Hochschule Luzern – Technik & Architektur  
Horw, 27. Dezember 2023

## Gruppe Orange

Yannick Kulli

Merlin Blickisdorf

Elektrotechnik

Elektrotechnik

yannick.kulli@stud.hslu.ch

merlin.blickisdorf@stud.hslu.ch

# Strommessung per Induktion

Messprinzip: Rogowskispule

Betreuer Dozenten:

Prof. Rolf Mettler

## Inhaltsverzeichnis

Abstract .....	3
1 Aufgabenstellung .....	3
2 Theorie .....	4
3 Rogowskispule .....	5
3.1 Gekaufte Rogowskispule.....	5
3.2 DIY-Rogowskispule.....	7
3.3 Verstärkerschaltung.....	8
3.4 Resultat.....	12
3.5 Diskussion .....	15
4 Fazit.....	17
5 Ausblick .....	18
6 Verzeichnisse .....	19
6.1 Literatur- und Quellenverzeichnis.....	19
6.2 Abbildungsverzeichnis .....	19
7 Anhang .....	20
7.1 Datenblatt Rogowski-Spule.....	20
7.2 Diverse Berechnung .....	24
7.3 Diverse Notizen.....	29

## Abstract

Im Rahmen des Moduls «AE – Advanced Electronics» der Hochschule Luzern Technik und Architektur wird die Aufgabe gestellt, eine komplexe Schaltung zu entwerfen. Dabei können die Studierenden frei wählen, was für eine Schaltung sie entwerfen möchten. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass die Schaltung eine gewisse Komplexität beinhalten muss. Das Modul selbst vertieft die beiden Pflichtmodule «ELO1 – Elektronik 1» und «ELO2 – Elektronik 2». Dabei ist das Modul AE ein Wahl- bzw. Erweiterungsmodul, welches den Stoff weiter vertieft und auf bekannte Techniken und Probleme der Wirtschaft eingeht.

Das Team dieser vorliegenden Arbeit, bestehend aus Yannick Kulli und Merlin Blickisdorf, hat sich die Aufgabe gestellt, eine Rogowskispule inklusive Schaltung für die Messung von Strömen zu bauen. Die folgende Arbeit beinhaltet die Aufgabenstellung, wie das Team an die Arbeit herangegangen ist und dessen Resultate und Schlussfolgerungen.

## 1 Aufgabenstellung

Die diesjährige Aufgabenstellung im Modul «Advanced Electronics» dieses Teams besteht darin, eine Schaltung für eine Rogowskispule zu entwerfen. Durch die Schaltung soll der Stromfluss in einem Leiter gemessen werden. Dies soll möglich sein, ohne den stromdurchflossenen Leiter von der Last zu trennen. Deswegen ist eine Rogowskispule von Vorteil, da diese, im Gegensatz zu einer herkömmlichen Wandler-Messung, nicht einen geschlossenen Kern besitzt. Die Rogowskispule kann entweder zugekauft, oder selbst erstellt werden. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass der soeben erwähnte Vorteil gegeben ist. Falls keine solche Spule erworben werden kann, muss selbst eine gebaut werden. Weiter soll im Integrationsglied der Verstärkung kein paralleler Widerstand zur Kapazität eingesetzt werden, da dieser die Messergebnisse leicht verfälscht. Zudem soll jeglicher Offset, welcher der Integrator integriert, kompensiert werden, ohne bei der Rückführung des DC-Offsets einen Operationsverstärker einzusetzen. Der Nachteil eines DC-Offset liegt darin, dass sich der Aussteuerungsbereich des OP verkleinert, da die Grenzen der Speisung, entweder in positiver oder negativer Richtung erreicht werden.

Für die Arbeit ist ein Zeitfenster von etwa zehn Wochen vorgegeben, wobei gegen Ende des Semesters noch eine weitere Woche für die Arbeit genehmigt wurde. Pro Woche können, während dem Unterricht, etwa zwei Stunden für die Arbeit genutzt werden.

## 2 Theorie

Es gibt viele Möglichkeiten, den Stromfluss in einem Leiter zu messen. Dabei wird zwischen invasiven Strommessgeräten, wie die Strommessung mit einem Shunt, und nicht invasiven Strommessgeräten unterschieden, wie die Strommessung mit einem Wandler. Bei den nicht invasiven Strommessverfahren gibt es diverse Techniken. Zum einen gibt es die klassischen Wandler Messungen, welche unter anderem ab 80 A in Hausinstallationen zu finden sind.<sup>1</sup> Zum anderen gibt es die optischen Stromwandler, welche auf dem Faraday Effekt basieren. Eine weitere Möglichkeit ist, eine Luftspule einzusetzen, die sogenannte Rogowskispule.<sup>2</sup>

Rogowskispulen werden heutzutage in vielen Bereichen der Messtechnik eingesetzt. Entweder im Entwicklungsbereich, z.B. um den Drain Strom eines MOSFET zu messen, oder um den Strom bei grossen Schienen in Hochspannungsanlagen zu messen.

Der Vorteil der Rogowskispule ist, dass diese in den meisten Fällen ein offenes Ende hat und somit während dem Betrieb um einen stromdurchflossenen Leiter angebracht werden kann, ohne den Leiter von der Last zu trennen. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Rogowskispule liegt in seiner Robustheit. Auch im Kurzschlussfall kann der Strom gemessen werden, ohne die Verstärkerschaltung zu beschädigen. Zudem weist die Spule, dank fehlendem Eisenkern, ein sehr lineares Verhalten im gesamten Messbereich auf. Ein Nachteil ist jedoch, dass für die Messung des Stromes eine raffinierte Verstärkerschaltung vornötig ist.

In der Abb. 1 ist das Ersatzschaltbild einer Rogowskispule zu erkennen (orange umrandet). Wenn man diese ideal betrachtet, ist die Spule L<sub>3</sub>, der Widerstand R<sub>1</sub> und die Kapazität C<sub>S</sub> nicht vorhanden und die Rogowskispule verhält sich wie eine ideale Spule. Der stromdurchflossene Leiter mit der Induktivität L<sub>1</sub> erzeugt ein magnetisches Feld, welches in der Induktivität der Rogowskispule L<sub>2</sub> eine Spannung induziert.<sup>3</sup>

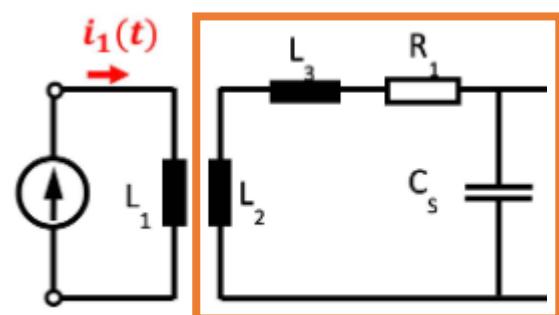


Abb. 1: Ersatzschaltbild Rogowskispule

Somit gelten folgende physikalische Gesetzmäßigkeiten:

$$u_{Rogowski}(t) = L_{Rogowski} * \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$L_{Rogowski} = \frac{\mu_0 * N * A}{l_m}$$

Gemäss zweiter Formel lässt sich die Induktivität L<sub>Rogowski</sub> der Spule berechnen. Die Induktivität hängt von den Anzahl Windungen N, dem Querschnitt des Kerns A und der mittleren Feldlinienlänge im Ring l<sub>m</sub> ab. Da bei einer Belastung, die begrenzte induzierte Spannung hauptsächlich über der Last abfällt, kann praktisch keine Spannung mehr über der Rogowskispule gemessen werden. Aus diesem Grund darf die nicht belastet werden.

<sup>1</sup> (7. Mess-, Steuer- und Kommunikationseinrichtungen, 2023)

<sup>2</sup> (Minkner, 2020)

<sup>3</sup> (schutztechnik.com, 2021)

### 3 Rogowskispule

Im folgenden Kapitel werden die Überlegungen, Versuche und deren Resultate und Interpretationen dieses Projektes behandelt.

#### 3.1 Gekaufte Rogowskispule

Um möglichst schnell in das Projekt starten zu können, wurde eine Rogowskispule zugekauft, siehe Abb. 2. Diese besitzt jedoch einen geschlossenen Ring, weshalb sie in diesem Projekt nur für Test- und Vergleichszwecke eingesetzt wurde. Gleich nach Erhalt der Spule, wurde dessen Innenwiderstand gemessen. Folgender Innenwiderstand konnte ermittelt werden:

$$R_I = 244 \Omega$$

Der gemessene Innenwiderstand war überraschend gross, denn die Spule hat nur einen Aussendurchmesser von etwa 37 mm und eine Höhe von etwa 15.5 mm. Deswegen wurde in Auftrag gegeben, die Spule mit einem Tomographen zu analysieren. Dabei sind diverse hochauflösende Schnitte und ein finales 3D-Bild entstanden, siehe Abb. 3.



Abb. 2: Gekaufte Rogowskispule

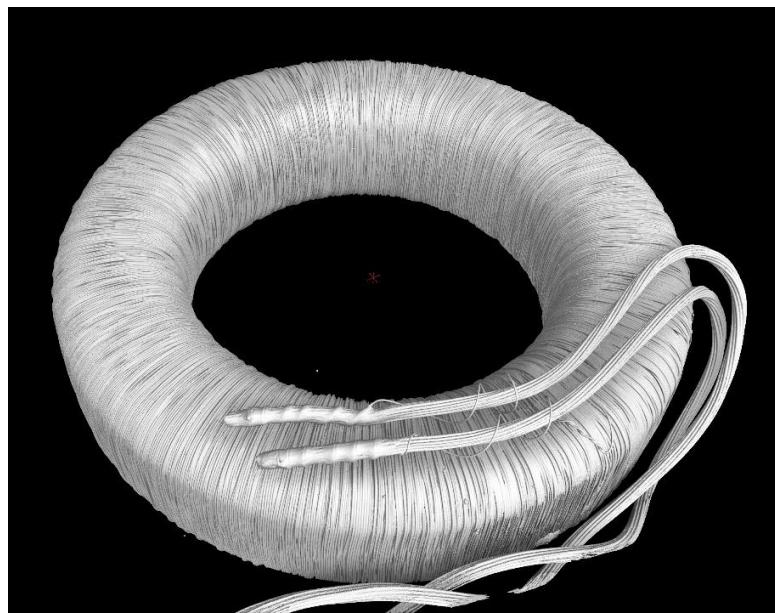


Abb. 3: Tomographen-Scan der gekauften Spule

Anschliessend war deutlich zu erkennen, dass es sehr viele Windungen in dieser kleinen Spule gibt. Mittels dem Programm GIMP konnte der Durchmesser eines Drahtes ermittelt werden, indem eines der Schnitte eingesetzt wurde, wobei die Anzahl Pixel eines Drahtes mit der Anzahl Pixel der Referenzlänge verglichen wurde.

Dabei konnte folgender Wert ermittelt werden:

$$\varnothing_{Draht} = 0.08 \text{ mm}$$

Anschliessend konnte die Drahlänge wie folgt errechnet werden:

$$R_l = \frac{\rho * l}{A} \rightarrow l = \frac{R_l * \left(\frac{\varnothing_{Draht}}{2}\right)^2}{\rho} = \frac{244 \Omega * \left(\frac{0.08 \text{ mm}}{2}\right)^2}{0.0175 \frac{\Omega * m}{mm^2}} \approx 70.08 \text{ m} \rightarrow 70 \text{ m}$$

Somit beträgt die Drahlänge etwa 70 m. Die Anzahl Windungen wurde, mit gleicher Methodik wie vorhin, in zwei Varianten ausgerechnet. Folgende Werte konnten dabei ermittelt werden:

$$n_{Windungen} = 3122 \dots 3512 \text{ Windungen}$$

Die Anzahl Windungen liegt somit zwischen 3122 und 3512 Windungen. Die erwähnten Berechnungen können im Anhang nachvollzogen werden.

Weiter wurde zur Kontrolle des Datenblatts noch die Resonanzfrequenz der Spule ermittelt. Die Abb. 4 zeigt dabei das Frequenzspektrum auf. Die Resonanzfrequenz bei der Spitze des Graphen liegt bei etwa 70 kHz. Das Datenblatt der gekauften Rogowskispule ist dem Anhang beigelegt.

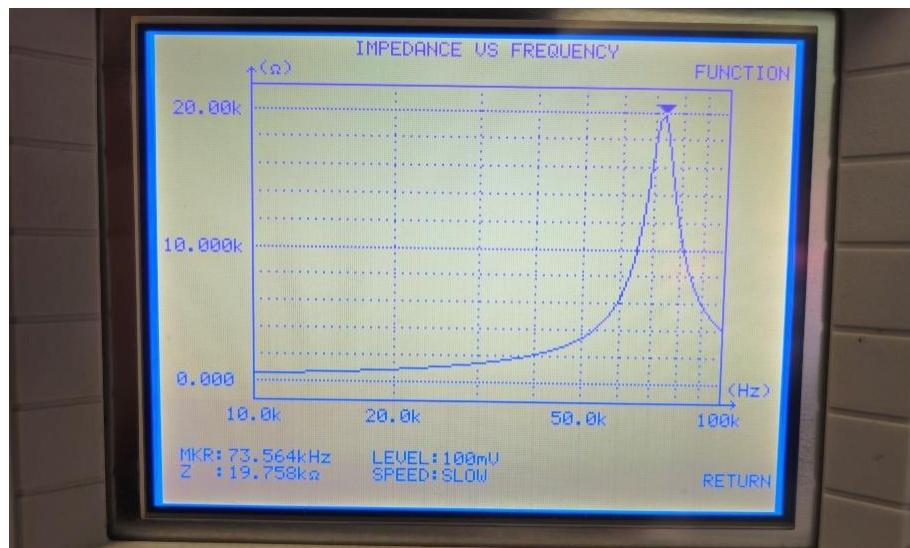


Abb. 4: Messung der Resonanzfrequenz mit dem Egston Pulse Messgerät

## 3.2 DIY-Rogowskispule

Da bei der gekauften Spule der wesentliche Vorteil einer Rogowskispule, und zwar dass dieser ein offenes Ende hat und während dem Betrieb um einen Leiter angebracht werden kann, schlichtweg nicht vorhanden ist, wurde entschieden eine eigene «Do it yourself» Spule zu bauen. In der Abb. 5 ist der Herstellungsprozess der ersten Version zu sehen. Dabei wurde diese Version in vielen Variationen ausgeführt, und zwar mit den Drahtquerschnitten von 3 mm, 4 mm, 5 mm und 7 mm. In der erwähnten Abbildung ist eine Variation mit 5 mm zu erkennen.

In der Abb. 6, eine Variation mit 3 mm Querschnitt. Die Schwierigkeit bei kleineren Querschnitten liegt darin, dass der Draht rasch reisst, jedoch trotzdem gut angezogen werden muss, um eine gleichmässige Windung erreichen zu können.

Beim Testen der Variationen der ersten Version konnten jedoch nicht die gewünschten Resultate erreicht werden, weshalb eine weitere Version gebaut wurde. In der Abb. 7 ist die zweite Version der DIY-Rogowskispule zu erkennen.

Diesmal wurde ein schwarzes Koaxialkabel für Kleinantennen als mittlerer Draht eingesetzt. Dabei wurde der äussere Mantel und der Schirm des Koaxialkabels zuerst entfernt, bis nur noch der zentrale Leiter und dessen weisser Mantel vorhanden ist. Anschliessend wurde ein Kupferdraht mit 5 mm Durchmesser um den weissen Mantel gewickelt, ähnlich wie in Abb. 7. Dann wurde an der Spitze der Spule der zentrale Leiter des Koaxialkabels mit dem Kupferdraht zusammengelötet. Zum Schluss wurde das Ganze noch in einen Schrumpfschlauch eingefasst, damit der aufgewickelte Kupferdraht seine Position hält und keine Schäden nimmt. Die zwei Enden, welche dann am Ende des schwarzen Schrumpfschlauches übrigbleiben, sind die Anschlüsse der Rogowskispule. Da diese Spule eine ordentliche Länge von 16 cm umfasst (**roter Teil**), kann sie ohne Probleme zweimal um einen Leiter gewickelt werden. Dadurch wird die gemessene Sensitivität verdoppelt.

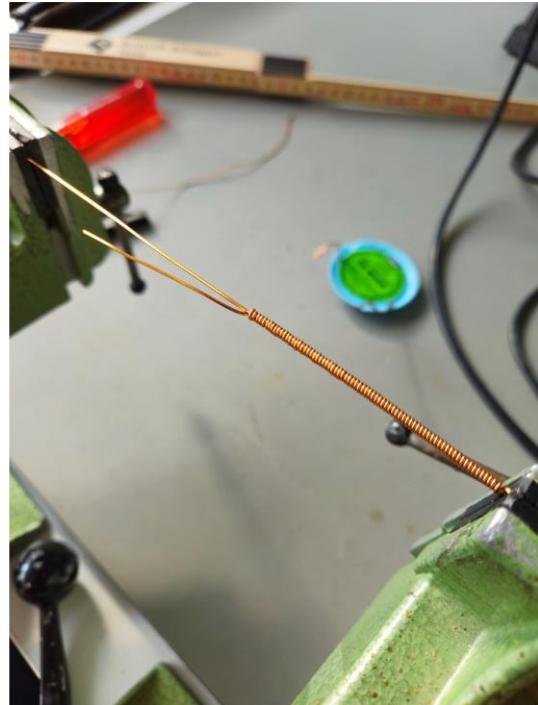


Abb. 5: Herstellungsprozess der DIY-Rogowskispule

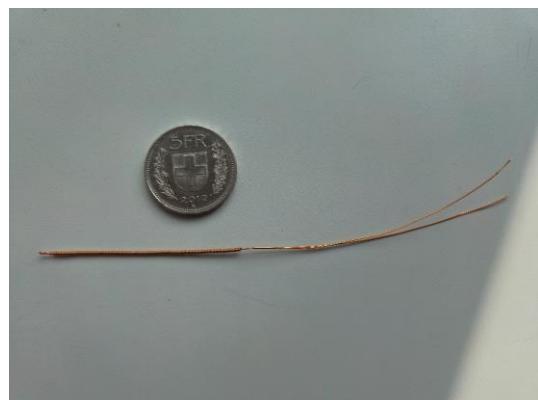


Abb. 6: DIY-Rogowskispule ohne Mantel Version 1



Abb. 7: DIY-Rogowskispule mit Mantel Version 2

### 3.3 Verstärkerschaltung

Da eine Rogowskispule, wie praktisch jeder Sensor nur eine schwaches Signal erzeugt, muss dieses schwache Signal verstärkt werden. Deswegen wurde eine Verstärkerschaltung entwickelt. In der folgenden Abb. 8 ist die erstellte Schaltung zu erkennen. Da die zugekaufte Spule kein offenes Ende hat, wurde die Schaltung für die eigens erstellte Spule bei 50 Hz konzipiert.

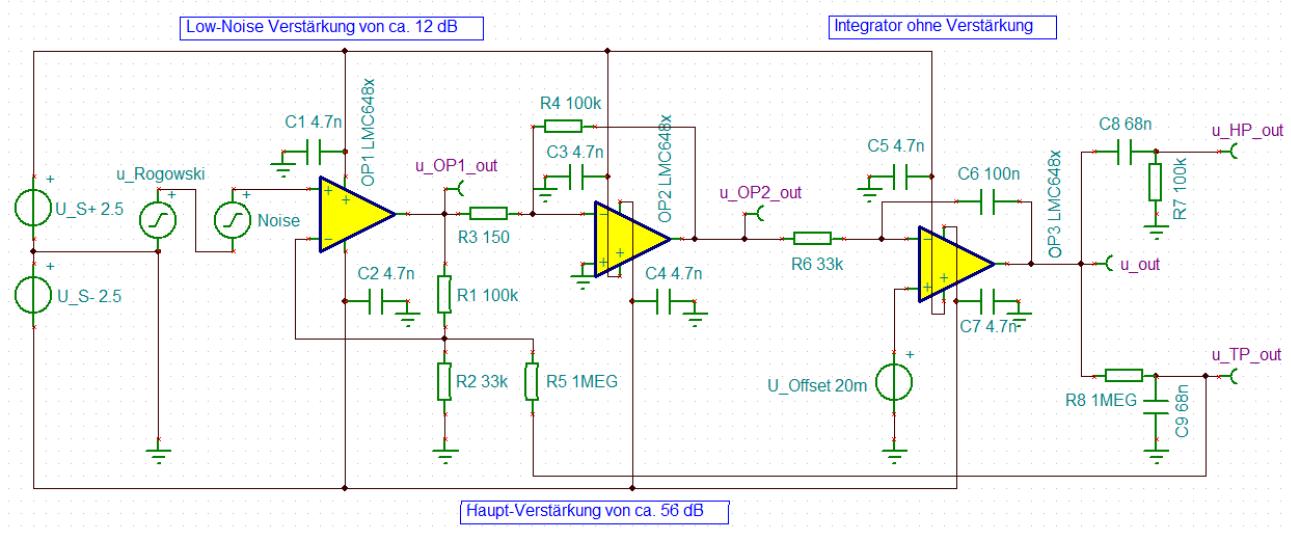


Abb. 8: Verstärkerschaltung für die Rogowskispule

Die Schaltung besitzt drei Operationsverstärker. Die ersten beiden verstärken das Signal, der dritte integriert das Signal, um eine störungsfreie und saubere Sinusschwingung am Ausgang zu erhalten. Da die Rogowskispule nicht belastet werden darf, weil die Spannung in die Knie gehen und somit das Resultat verfälschen würde, ist der erste OP als nicht invertierender Verstärker konzipiert, welcher folgende Verstärkung besitzt:

$$G_{OP1} = 20 * \log \left( \frac{R2}{R1} + 1 \right) = 20 * \log \left( \frac{100 k\Omega}{33 k\Omega} + 1 \right) \approx 12.11 dB$$

Der erste OP besitzt nur eine kleine Verstärkung, damit Störungen der Spule nicht unnötig stark verstärkt werden. Der zweite OP ist als invertierender Verstärker konzipiert und hat die Aufgabe, die Hauptverstärkung zu übernehmen. Dabei wurde beim Widerstand R beim Testen zunächst ein Potentiometer eingesetzt, jedoch gegen Schluss durch einen  $150 \Omega$  Widerstand ausgetauscht. Der invertierende OP besitzt eine Verstärkung von:

$$G_{OP2} = 20 * \log \left( \left| -\frac{R4}{R3} \right| \right) = 20 * \log \left( \frac{100 k\Omega}{150 \Omega} \right) \approx 56.49 dB$$

Der dritte OP ist ein Integrator, welcher das gestörte Sinussignal integriert und Störungen hoher Frequenz dämpft. Die frequenzabhängige Übertragungsfunktion lautet wie folgt:

$$H(s) = -\frac{\frac{1}{s * C6}}{R6} = -\frac{1}{s * C6 * R6}$$

Die Übertragungsfunktion verhält sich wie eine Hyperbel. Je höher die Frequenz, desto höher die Dämpfung des Integrators. Bei 50 Hz hat der Integrator eine leichte Dämpfung von:

$$G_{\text{Integrator}}(f = 50 \text{ Hz}) = 20 * \log \left( \left| -\frac{1}{2\pi * f * C6 * R6} \right| \right)$$

$$= 20 * \log \left( \frac{1}{2\pi * 50 \text{ Hz} * 100 \text{ nF} * 33 \text{ k}\Omega} \right) = 20 * \log (0.9646) \approx -0.31 \text{ dB}$$

Beim erstmaligen Testen der Schaltung ist aufgefallen, dass der Integrator durch den kleinen DC-Offset der OPs davon wandert und nicht im definierten Aussteuerungsbereich bleibt. Dies hat damit zu tun, dass bewusst dagegen entschieden wurde, beim integrierenden Kondensator C6 einen parallelen Widerstand anzutragen, da dieser die Strommessung verfälschen würde. Folglich wurde am Ende der Schaltung, also u\_out, ein Tiefpassfilter angelegt, welcher durch den Widerstand R5 mit dem Verstärkungsglied des ersten OP verbunden ist. Diese Verbindung koppelt den entstehenden DC-Offset auf den ersten Verstärker zurück und gleicht diesen somit aus. Der Tiefpassfilter hat folgende Grenzfrequenz:

$$f_{g_{TP}} = \frac{1}{2 * \pi * R8 * C9} = \frac{1}{2 * \pi * 1 \text{ M}\Omega * 68 \text{ nF}} \approx 2.34 \text{ Hz}$$

Über dem Tiefpass ist noch ein Hochpassfilter angeordnet. Dieser entfernt jeglichen Offset, welcher nach der Rückkopplung noch übrig bleibt. Er hat eine Grenzfrequenz von:

$$f_{g_{HP}} = \frac{1}{2 * \pi * R7 * C8} = \frac{1}{2 * \pi * 100 \text{ k}\Omega * 68 \text{ nF}} \approx 23.41 \text{ Hz}$$

Das Ausgangssignal ist somit bei u\_HP\_out zu betrachten, da das Signal dort praktisch offsetfrei und geglättet ist. In der folgenden Abb. 9 ist eine Transienten Analyse, ohne Rauschen, der Schaltung zu erkennen. Beim Eingang, also u\_Rogowski, wurde eine Sinusspannung von  $\pm 500 \mu\text{V}_p$  mit einer Frequenz von 50 Hz angelegt.

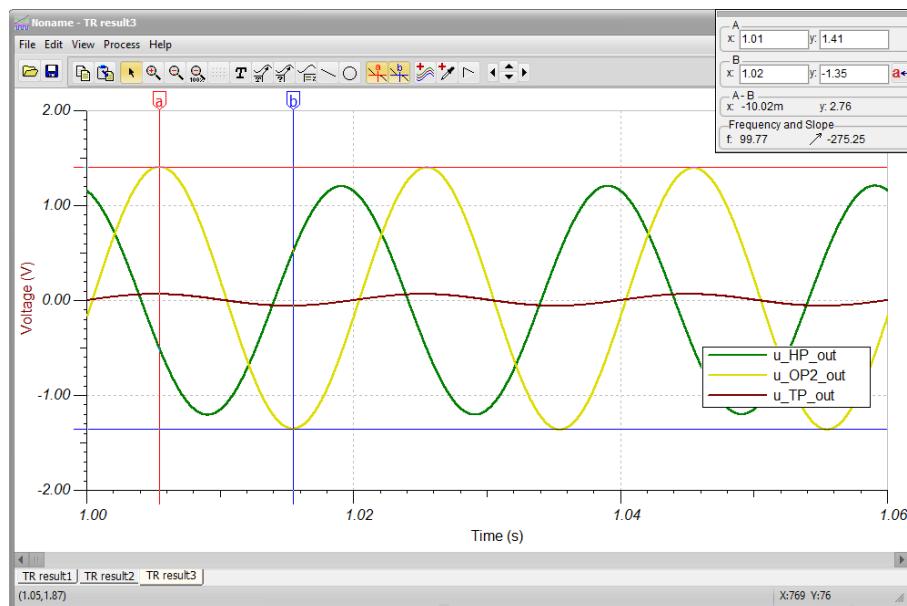


Abb. 9: Simulation ohne Rauschen

Es ist klar zu erkennen, dass die Ausgangsspannung u\_HP\_out bei etwa  $\pm 1.2 \text{ V}_p$  liegt. Somit liegt die gesamte Verstärkung der Schaltung bei etwa:

$$G_{tot} = 20 * \log \left( \frac{\hat{u}_{HPout}}{\hat{u}_{Rogowski}} \right) = 20 * \log \left( \frac{1.2 Vp}{0.5 mVp} \right) \approx 67.6 dB$$

Dieser dB-Wert ist etwas kleiner als die beiden Verstärkungen G\_OP1 und G\_OP2 addiert und somit dämpft der Integrator leicht. Weiter kann mit den beiden Cursors a (in rot) und b (in blau) der Offset der Spannung u\_OP2\_out vor dem Integrator wie folgt bemessen werden:

$$U_{Offset_{OP2}} = \frac{\hat{U}_{pos} - |\hat{U}_{neg}|}{2} = \frac{1.41 V - |-1.35 V|}{2} = 0.03 V = 30 mV$$

Als Nächstes ist in der Abb. 10 dieselbe Transienten Analyse mit Rauschen zu erkennen. Dabei wurde ein Dreiecksignal mit einer Spannung von  $\pm 100 \mu Vp$  und einer Frequenz von 5 kHz dem Eingangssignal u\_Rogowski überlagert, welches das Rauschen simulieren soll.

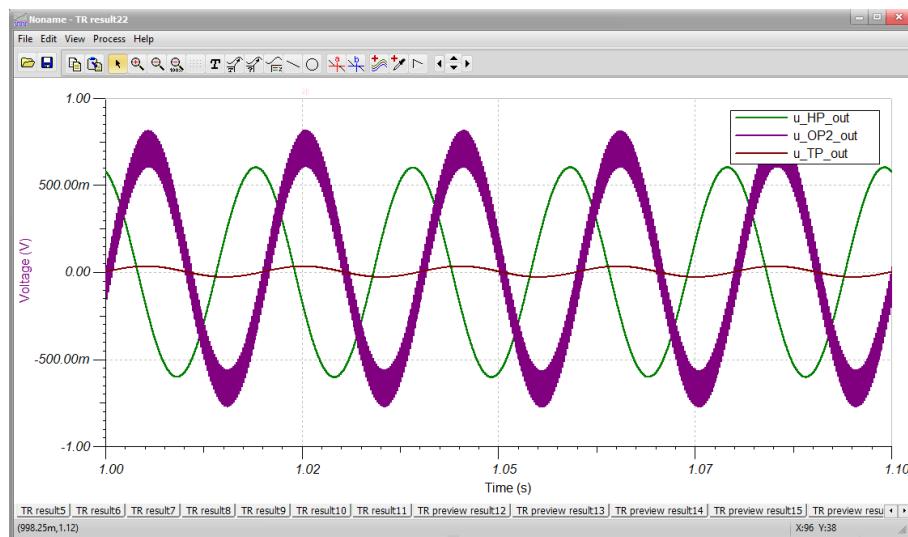


Abb. 10: Simulation mit Rauschen

Bei der Ausgangsspannung u\_OP2\_out ist in Violett eine Hüllkurve zu erkennen. Dies ist das verstärkte Signal des Sensors inklusive den Störungen. In der Ausgangsspannung u\_HP\_out ist diese jedoch nicht mehr zu erkennen und somit wird die Störung durch den Integrator entfernt. Nach dem Optimieren der Schaltung durch diverse Tests auf dem Steckbrett und weiteren Simulationen, wurde die Schaltung auf einer geschirmten Laborkarte gelötet, siehe Abb. 11.

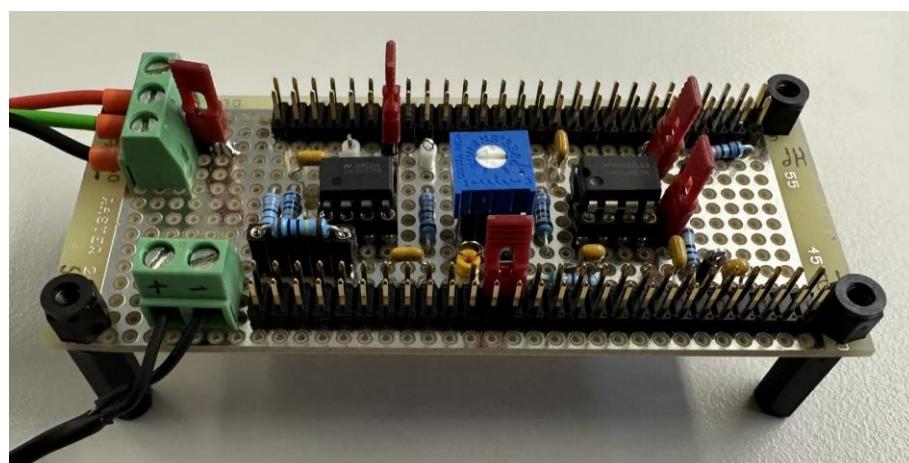


Abb. 11: Finale Schaltung gelötet auf geschirmter Laborkarte

Aus Zeitgründen wurde kein PCB entwickelt. Folglich musste eine Layoutplanung erstellt werden, damit beim Löten der Schaltung von Hand keine Fehler passieren. Die erwähnte Layoutplanung kann dem Anhang unter «Diverse Notizen» entnommen werden. Anschliessend wurde das PCB gelötet, das Resultat ist in der Abb. 11 zu sehen. Das blaue Potentiometer wurde, wie bereits erwähnt, mit einem  $150\ \Omega$  Widerstand ersetzt. Die roten Jumper sind dafür gedacht, entweder den Schirm der Laborkarte zu entfernen, einen parallelen Widerstand über dem integrierenden C anzuschliessen oder die beiden Filter zu entfernen. Dies wurde jedoch nur zu Testzwecken realisiert.

## 3.4 Resultat

Im folgenden Kapitel wird auf die Qualität der Schaltung durch empirisches Messverfahren eingegangen. Dabei wird bewusst kein Vergleich zwischen der gekauften Spule und der selbst hergestellten Rogowski Spule gezogen. Dieser Entscheid basiert auf den folgenden zwei Gründen: Einerseits ist die gekaufte Spule Bauart technisch weder mit der gebauten noch mit einer effektiven Rogowskispule zu vergleichen. Andererseits überwiegt der Zeitaufwand den Gewinn.

### 3.4.1 Linearität und Messbereich

In erster Linie funktioniert das Board mit der selbsterstellten Rogowskispule. Jedoch ist dies aufgrund des Aufbaus und der Komplexität nicht mit einem industriellen Gerät zu vergleichen. Die Verstärkung ist grösstenteils linear, was in der folgenden Abb. 12 sichtbar ist.

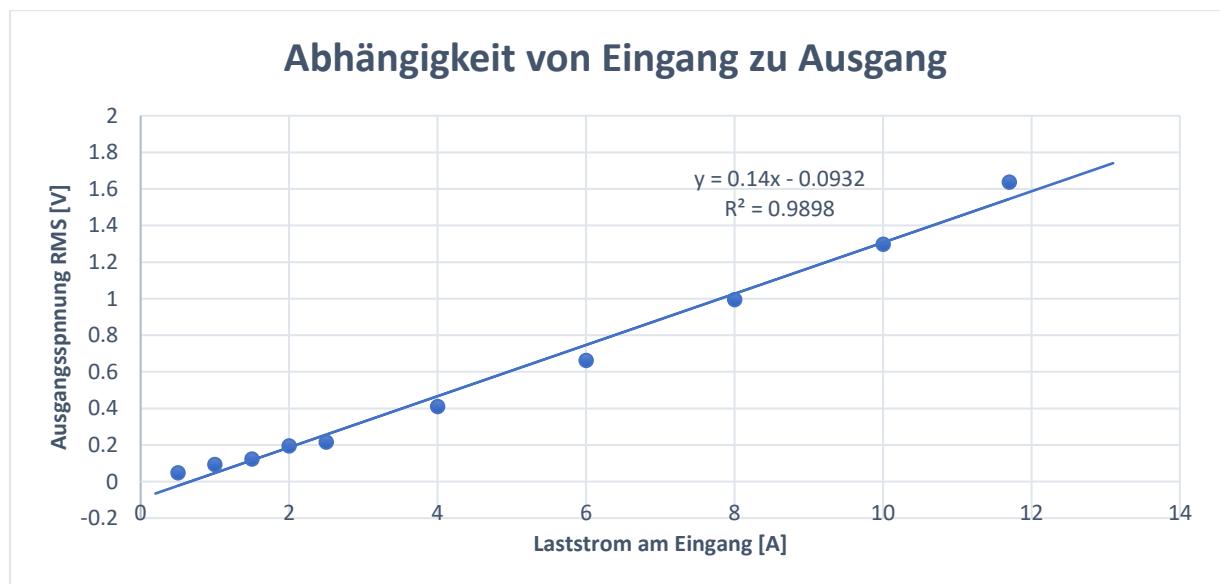


Abb. 12: Abhängigkeit des gemessenen Stromes zur Ausgangsspannung mit Linearisierung

Für diese Messungen wurde folgender Versuchsaufbau verwendet: Mittels eines Variacs und einem Trafo konnten Ströme bis 2.5 A erzielt werden. Dieser Strom wurde mittels Kabel durch die Rogowskispule geführt. Dabei wurde die Spule zweimal um den Leiter gewickelt. Für die grösseren Ströme wurde der stromführende Leiter mehrfach durch die Spule geführt.

Gemessen wurde der komplette Messbereich der Schaltung. Bei einer Speisung von  $\pm 2.5$  Vp liegt somit der maximale Effektivwert der Spannung bei:

$$u_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot u_P = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \pm 2.5 V = 1.67 V_{RMS}$$

Die untere Messgrenze des Systems ist aufgrund additiven Rauschens der Schaltung begrenzt. Dies ist vorwiegend bei Messungen ausserhalb der Netzfrequenz von 50 Hz sichtbar.

In der Abb. 12 ist der lineare Zusammenhang zwischen dem fliessenden Strom  $I_{\text{Last}}$  und der gemessenen Ausgangsspannung  $u_{\text{RMS}}$  anschaulich sichtbar. Des Weiteren ist auch der Umrechnungsfaktor von etwa  $0.14 \frac{V}{A}$  ablesbar.

In der Abb. 13 ist diese Spannungsbegrenzung des zweiten Verstärkers sichtbar. Dabei handelt es sich beim Signal in Gelb um die Ausgangsspannung des zweiten Verstärkers, welche in diesem Fall die Ausgangsspannung limitiert. Dabei zu beobachten, dass asymmetrische Rail-to-Rail Prinzip des OPs, da das gelbe Signal nur in der positiven Amplitude durch den OP abgeschnitten wird. Hingegen weist die negative Halbwelle immer noch einen sinusförmigen Charakter auf.

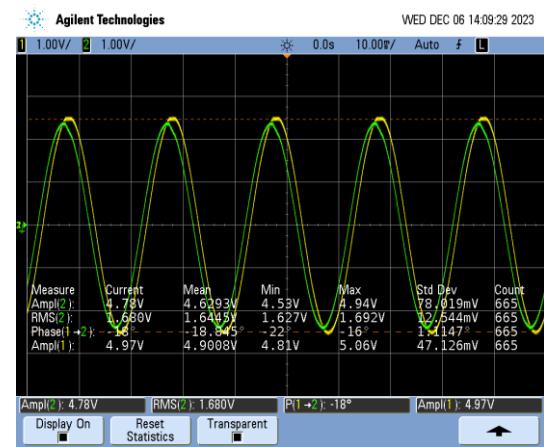


Abb. 13: Limitierung der zweiten Verstärkerschaltung  
Kanal Gelb: Ausgangsspannung des zweiten Verstärkers. Grüner Kanal: Ausgangsspannung des Integrators nach dem Hochpassfilter

### 3.4.2 Frequenzeinfluss

Um den fliessenden Strom eines beliebigen Signals messen zu können, wird nach der Aufbereitung und Verstärkung des Signals dieses anschliessend integriert. Dafür wird ebenfalls ein Operationsverstärker verwendet.

$$U_{\text{out}} = -\frac{1}{C} \int_{T_0}^{T_0 + \Delta t} I_{\text{in}} \cdot dt$$

Da die Integrationszeit  $t = \frac{1}{f}$  abhängig von der Frequenz des zu messenden Stromes ist, verhält sich dieser Teil der Schaltung nicht linear.

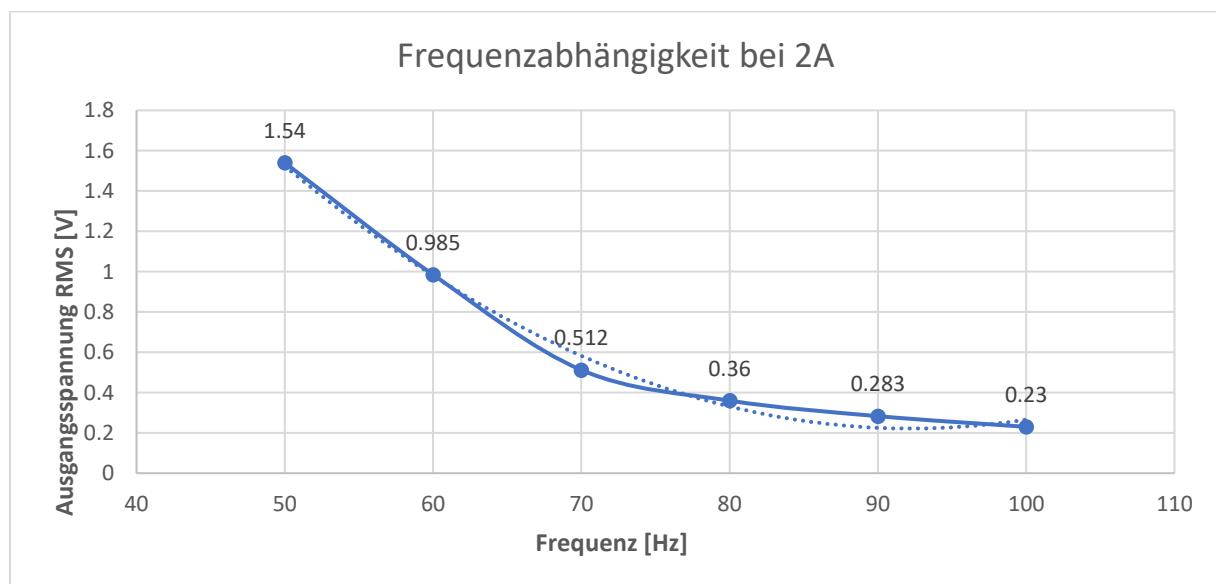


Abb. 14: Linearität der Schaltung bei wechselndem Strom am Eingang

In der Abb. 14 kann man erkennen, dass je grösser die Frequenz ansteigt, desto weniger Zeit der Operationsverstärker hat, um den fliessenden Strom zu Integrieren. Somit sinkt die Ausgangsspannung bei steigender Frequenz. War hier gemessen wird ist die Übertragungsfunktion. Dabei ist sehr schön die Hyperbel zu beobachten.

Dieser Hyperbeleffekt von  $y = \frac{1}{x}$  ist so drastisch, dass bereits bei Frequenzen im tiefen Kilohertz Bereich das Signal mehr Schwankungen der Störeinflüsse durch das 50 Hz Netz aufweist als durch das Nutzsignal selbst.

In der Abb. 15 nebenan ist ein Beispiel von einem Stromfluss von 2 A bei einer Frequenz von 500 Hz zu sehen. Die Überlagerungen der Störeinflüsse des 50 Hz Netzes sind in den Hüllkurven der Signale passend erkennbar. Dabei verfügt es über eine Amplitude von ungefähr 25 mV, was im Gegensatz zur Amplitude bei 50 Hz, von etwa 294.5 mV, viel kleiner ist.

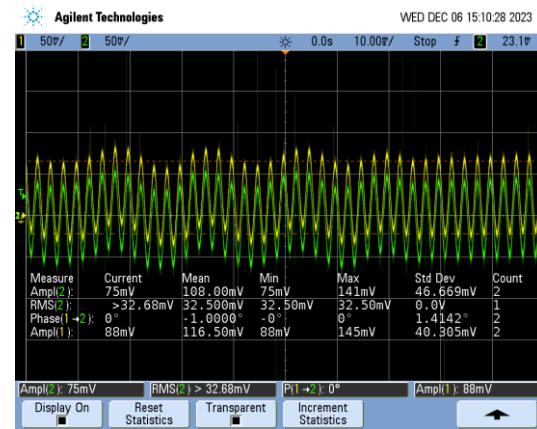


Abb. 15: Überlagerungen von Störungen des Netzes. Kanal Gelb: Ausgangsspannung des zweiten Verstärkers. Grüner Kanal: Ausgangsspannung des Integrators nach dem Hochpassfilter

### 3.4.3 Induzierte Spannung der Rogowskispule

Um die induzierte Spannung der Rogowskispule zu bestimmen, wurde derselbe Messpunkt wie vorhin gewählt, also 2 A bei einer Frequenz von 50 Hz. Dabei wurde am Ausgang vom OP2 eine Spannung von 294.5 mV beim Oszilloskop abgelesen. Folgend die Herleitung der gesuchten Spannung:

$$\hat{u}_{OP1_{Peak}} = \frac{\hat{u}_{OP2_{Peak}}}{G_{OP2}} = \frac{294.5 \text{ mVp}}{666.6} \approx 441.75 \mu\text{Vp}$$

$$\hat{u}_{Rogowski_{Peak}} = \frac{\hat{u}_{OP1_{Peak}}}{G_{OP1}} = \frac{441.75 \mu\text{Vp}}{4.03} \approx 109.62 \mu\text{Vp}$$

$$u_{Rogowski_{RMS}} = \frac{\hat{u}_{Rogowski_{Peak}}}{\sqrt{2}} = \frac{109.62 \mu\text{Vp}}{\sqrt{2}} \approx 77.51 \mu\text{V}$$

Somit induziert die Rogowskispule bei einem Stromfluss von 4 A (da Rogowskispule zwei mal um den Leiter, also  $2 \cdot 2\text{A}$ ) eine Spannung von etwa  $78 \mu\text{V}$ .

Die gesamte Verstärkung, ohne Integration, kann mit der berechneten Spannung  $u_{Rogowski\_Peak}$  bestimmt werden:

$$G_{OP1+OP2} = 20 * \log \left( \frac{u_{OP2_{Peak}}}{u_{Rogowski_{Peak}}} \right) = 20 * \log \left( \frac{294.5 \text{ mVp}}{109.62 \mu\text{Vp}} \right) \approx 68.59 \text{ dB}$$

Dieser Wert ist sehr nah an den in Kapitel 3.3 «Verstärkerschaltung» errechneten werten. Wenn man dort die beiden Verstärkungen von OP1 und OP2 addiert, erhält man eine Verstärkung von 68.6 dB, was erstaunlich nahe an der soeben berechnet 68.59 db ist.

## 3.5 Diskussion

In diesem Abschnitt wird vor allem auf die Messmethodik eingegangen. Dies dient der Reproduzierbarkeit und der Transparenz. Welche die Richtigkeit der Messergebnisse unterstützt.

### 3.5.1 Schaltungsaufbau

Hier wird kurz auf den Schaltungsaufbau und dessen Funktion eingegangen.

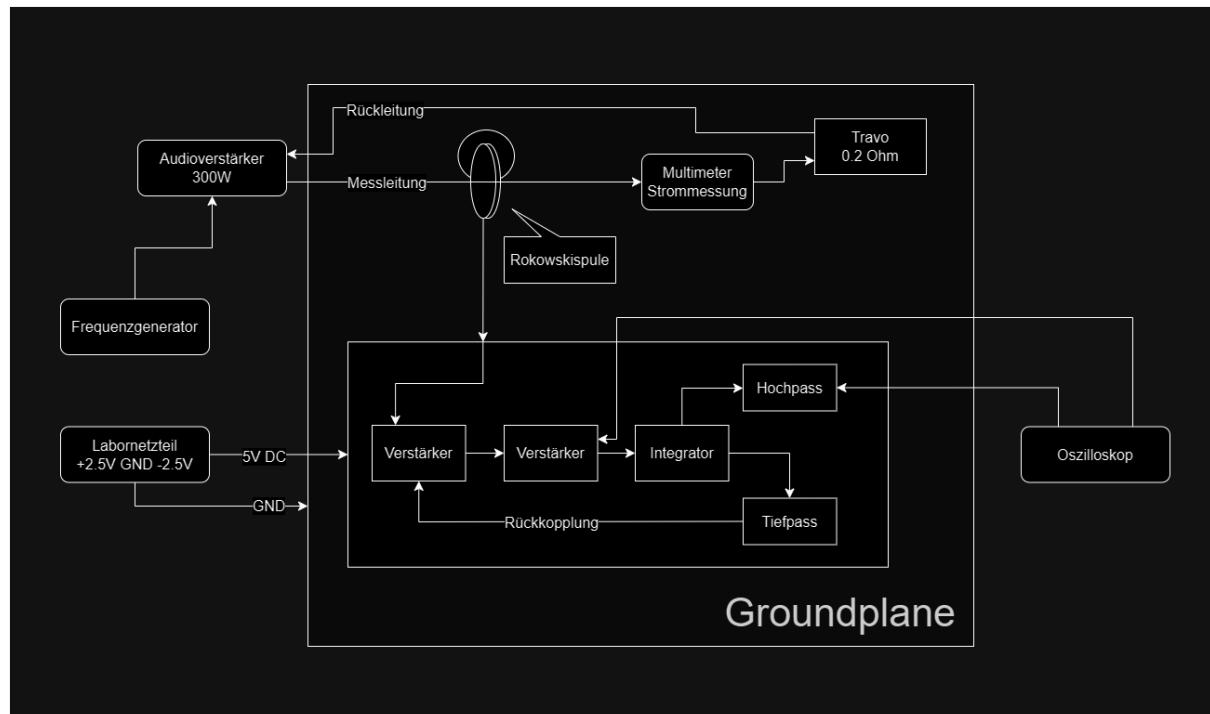


Abb. 16: Blockschaltbild der Schaltung und des Messaufbaus

Die Abb. 16 zeigt das Blockschaltbild des Messaufbaus. Dabei wurden drei externe Geräte benutzt. Auf der linken Seite sind die zwei Eingabegeräte zu sehen. Einerseits wurde ein Labornetzteil benötigt, welches die symmetrische Spannung von  $\pm 2.5$  V für die Schaltung liefert. Als Messquelle wurde ein Frequenzgenerator benutzt, welcher jedoch nicht genug Leistung lieferte, um einen sichtbaren Strom zu messen. Aus diesem Grund wurde dieses Signal mittels eines leistungsstarken Audioverstärkers verstärkt. Der Ausgang des Audioverstärkers wurde durch die Rogowskispule geführt und am Ende über der Primärseite eines Transformators beinahe kurzgeschlossen. Dazwischen befindet sich ein Multimeter zur Überprüfung und Regulierung des Eingangsstromes.

Um die Spannung am Ausgang der Schaltung zu messen, wurde ein Oszilloskop verwendet. Der Ausgangspunkt der Schaltung liegt am Ausgang des Hochpassfilters. Um sicherzustellen, dass kein OP bereits die Sättigung erreicht hat, wurde der Ausgang des zweiten OPs mit einer zweiten Messsonde überprüft.

Um mögliche externe Störungen zu minimieren, wurde eine grosse Aluminiumplatte als Unterlage benutzt. Diese wurde mit dem Ground des Labornetzteils verbunden. Dasselbe wurde mit dem integrierten Schirm der Laborkarte gemacht.

### 3.5.2 Messaufbau

Zu Beginn wurden diese Daten nach bestem Wissen und Gewissen möglichst neutral erstellt. Jedoch sind viele Faktoren dabei zu berücksichtigen. Die ganzen Messungen fanden in einer Laborumgebung statt. Dabei wurde versucht, jegliche äusseren Störfaktoren zu minimieren.

Der komplette Messaufbau für die Messergebnisse aus dem vorigen Abschnitt ist in der Abb. 17 ersichtlich. Dazu wurde eine grosse Aluminiumplatte als Unterlage verwendet, welche an den effektiven Erdungspunkt der Spannungsversorgung angeschlossen wurde. Dadurch sollten es zu weniger Störeinflüssen kommen.

Aufgrund starker EMV-Einflüsse durch das 50 Hz Stromnetz wurde zusätzlich aus verfügbaren Materialien einen eigenen Faraday'schen Käfig für die Rogowskispule gebaut. Dieser blockiert E-Felder und verhindert somit Störungen. Diese zeigt jedoch keine sichtbaren Verbesserungen des Ergebnisses.

Um die benötigten Frequenzen ausserhalb des 50 Hz Netzes zu generieren, wurde mittels eines Frequenzgenerators diese erzeugt und in einen 300 W Audioverstärker gegeben. Dessen Ausgang wurde über der Ausgangswicklung des Trafos kurzgeschlossen. Dieser beinhaltet einen Innenwiderstand von etwa  $0.2 \Omega$ . Dieser Widerstand wurde benötigt, da der Verstärker einen kompletten Kurzschluss nicht zuließ. Mittels Multimeter wurde der Strom gemessen und eingestellt. Um die vernichtete Leistung zu begrenzen, wurden insgesamt sieben Leiterdurchgänge durch die doppelte Rogowskispule verwendet.

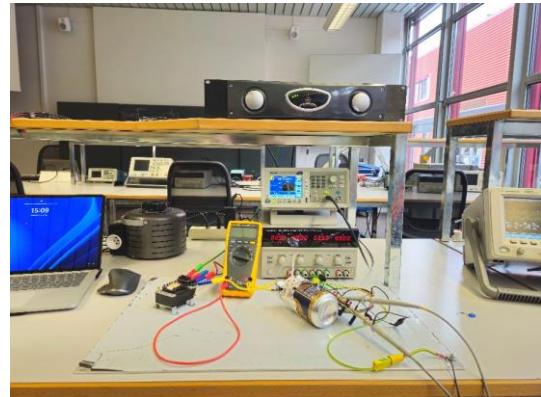


Abb. 17: Messaufbau für die Erhebung der Resultate

### 3.5.3 Datenerhebung

Hier liegt sicherlich die Schwachstelle der Resultate. Aufgrund der mangelnden Zeit wurde hierbei nur ein kleiner Datensatz erhoben. Des Weiteren wurden die Messungen auch nicht statistisch geprüft. Jedoch stimmen diese grösstenteils mit den mathematischen Modellen und Simulationsergebnissen überein.

## 4 Fazit

Abschliessend kann man sagen, dass dieses Projekt für das Team im Grunde ein Erfolg war. Die Aufgabenstellung konnte erfüllt werden und die Schaltung funktioniert unter den definierten Umständen, wie erwartet. Das Projekt hat dem Team viele neue Erkenntnisse gegeben und konnte nachhaltig das theoretisch gelernte Wissen festigen.

Bei den Tests der gesteckten Schaltung und der gelöteten Laborkarte gab es vereinzelt Schwierigkeiten und Situation, welche zunächst nicht erklärt werden konnten. Zumeist konnte jedoch nach mehrfacher Überprüfung der Schaltung ein Fehler gefunden werden. Einige Fehler waren jedoch hartnäckiger. Es gab etwa einen Unterrichtsblock, wobei man immerzu Probleme versuchte zu beheben und trotzdem am Ende der Lektion nicht weiter war als am Anfang. Es stellte sich zuletzt heraus, dass der Fehler in der Speisung lag.

Ein weiterer Punkt, welcher das Team verwirrt hat, ist der Schirm der Laborkarte. Entgegen den Erwartungen hat dieser nämlich absolut keinen visuellen Einfluss auf das Rauschen. Das heisst, es konnte auf dem Oszilloskop kein Unterschied ausgemacht werden, ob dieser Schirm mit dem Jumper am Ground angeschlossen war oder nicht.

Gegen Ende des Projektes hat die Schaltung jedoch immer besser funktioniert und auch die Erwartungen vollauf erfüllt. Dies vor allem aufgrund der funktionierenden Rückkopplung und der Verwendung einer Platine im Vergleich zu einem Steckboard. Ab dann konnten auch die notwendigen Messungen für die vorliegende Arbeit durchgeführt werden.

Folglich ist das Team der Gruppe Orange durchgehend zufrieden mit dem erhaltenen Resultat dieser Projektarbeit.

Im Anhang sind, nebst dem Datenblatt der Rogowskispule, jegliche Berechnungen und Notizen, welche im Prozess des Projektes erstellt wurden.

Zum Schluss bedankt sich das Team Orange noch recht herzlich bei Damian Gwerder für die grossartigen Tomographen Bilder und bei Dominic Schinner für den 300 W Audioverstärker, den wir ausleihen durften.

## 5 Ausblick

Folgend werden kurz die nächsten Schritte erwähnt, welche man in Angriff nehmen würde, falls das Projekt weiter verfolgt wird. Dabei werden mögliche Optimierungen, Erweiterungen und die Integration in ein vollständiges Produkt behandelt.

### 5.1.1 Optimierungen

Der erste Schritt in Richtung eines industriellen Produktes ist die Planung und Gestaltung einer eignen Platine. Dabei wichtig ist die passende Ausarbeitung eines EMV-Konzepts. Des Weiteren ist ein Messbereich der Schaltung zu bestimmen, um anschliessend die Operationsverstärker mit ihren Verstärkungen darauf abzustimmen. Mittels einer Weiterentwicklung der Rogowskispule im Bereich der Geometrie und Materialauwahl ist sicherlich mit einer Steigerung der Sensitivität zu rechnen. Speziell die Reduktion des Rauschens mittels LNA und Schirmung, könnte helfen das Produkt zu finalisieren.

### 5.1.2 Erweiterungen

Um das Produkt für Kunden nutzbarer zu gestalten, sollte das Anschlusskonzept erweitert werden. Die Rogowski Spule und der Messanschluss mittels BNC-Stecker zugänglich gestalte und eine eigene Spannungsversorgung, mittels eines proprietären Anschlusses übernehmen. Zum Schluss benötigt das Produkt ein passendes Gehäuse, welches bestenfalls zum EMV-Konzept beiträgt.

### 5.1.3 Integrationen

Bis zu diesem Punkt wird ein externes Messgerät benutzt, um die Spannung am Ausgang zu messen und auf den Strom zurückzurechnen. Dabei geschieht der Wechsel von einem Produkt zu einem Werkzeug. Mittels eines Mikrocontrollers, Bildschirmes und digitalen Potentiometers, kann automatisch die Verstärkung verändert und somit automatisch der Messbereich angepasst werden. Auch könnte eine Korrektur der Messergebnisse aufgrund alternativer Frequenzen geschaffen werden. Mittels Digitaltechnik und dessen ADCs wird das Signal gemessen und gleich in einen Strom umgerechnet. Dadurch ist das Produkt auch von nicht instruiertem Personal intuitiv bedienbar.

## 6 Verzeichnisse

Folgend sind die beiden Verzeichnisse, wie Literatur- und Quellenverzeichnis sowie Abbildungsverzeichnis aufgeführt.

### 6.1 Literatur- und Quellenverzeichnis

7. *Mess-, Steuer- und Kommunikationseinrichtungen*. (08. Dezember 2023). Von werkvorschriften-zentralschweiz.ch: <https://werkvorschriften-zentralschweiz.ch/werkvorschriften-wv-ch2021/7-ueberstromunterbrecher/seite-ueberstromunterbrecher/index.html> abgerufen
- Minkner, R. &. (2020). *Technologie der Messwandler : Strom- und Spannungsmessung und Isolationssysteme*. Springer Fachmedien Wiesbaden. Von <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30207-8> abgerufen

### 6.2 Abbildungsverzeichnis

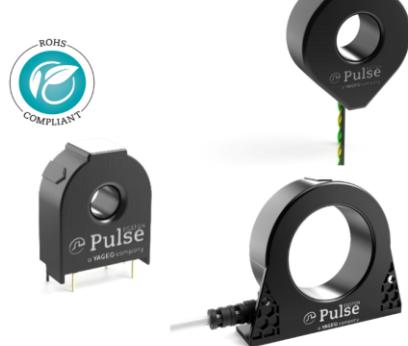
Abb. 1: Ersatzschaltbild Rogowskispule.....	4
Abb. 2: Gekaufte Rogowskispule.....	5
Abb. 3: Tomographen-Scan der gekauften Spule .....	5
Abb. 4: Messung der Resonanzfrequenz mit dem Egston Pulse Messgerät .....	6
Abb. 5: Herstellungsprozess der DIY-Rogowskispule .....	7
Abb. 6: DIY-Rogowskispule ohne Mantel Version 1 .....	7
Abb. 7: DIY-Rogowskispule mit Mantel Version 2 .....	7
Abb. 8: Verstärkerschaltung für die Rogowskispule.....	8
Abb. 9: Simulation ohne Rauschen .....	9
Abb. 10: Simulation mit Rauschen .....	10
Abb. 11: Finale Schaltung gelötet auf geschirmter Laborkarte .....	10
Abb. 12: Abhängigkeit des gemessenen Stromes zur Ausgangsspannung mit Linearisierung	12
Abb. 13: Limitierung der zweiten Verstärkerschaltung Kanal Gelb: Ausgangsspannung des zweiten Verstärkers. Grüner Kanal: Ausgangsspannung des Integrators nach dem Hochpassfilter.....	13
Abb. 14: Linearität der Schaltung bei wechselndem Strom am Eingang.....	13
Abb. 15: Überlagerungen von Störungen des Netzes. Kanal Gelb: Ausgangsspannung des zweiten Verstärkers. Grüner Kanal: Ausgangsspannung des Integrators nach dem Hochpassfilter.....	14
Abb. 16: Blockschaltbild der Schaltung und des Messaufbaus .....	15
Abb. 17: Messaufbau für die Erhebung der Resultate .....	16

## 7 Anhang

### 7.1 Datenblatt Rogowski-Spule

#### Rogowski - Current Sensor

RC01-SSS-O Series  
RC03-SSS-LLLL-O Series  
RC05-SSS-LLLL-O Series



- ④ Dynamic Range from 1 to 2500 Amps
- ④ Meets IEC 61869-10 Accuracy Class 1
- ④ Meets ANSI C12.20 Accuracy Class 1.0
- ④ Phase error <0.03 degree @ 50 Hz / 60 Hz
- ④ Bandwidth up to 50kHz
- ④ Immune to external AC magnetic fields
- ④ Immune to DC current & magnetic fields
- ④ Low temperature coefficient

Electrical Specifications @ 25°C - Operating Temperature -20°C to +80°C										
Description	Part Number	Sensitivity mV/kA			Wire length	typ. Resonance frequency	typ. Temperature coefficient	typ. external electromagnetic field	typ. external electrical voltage potential	mA (@230VAC / 50Hz)
		50 Hz	60 Hz	Tolerance						
<b>RC01-SSS-O</b>										
Rogowski Coil Size 01 - 100mV/kA	RC01-100	100	120	±1%	n.A.	370	30	0,2	60	
Rogowski Coil Size 01 - 100mV/kA - Shielded	RC01-100-S								25	
Rogowski Coil Size 01 - 200mV/kA	RC01-200	200	240	±1%	n.A.	200	25	0,2	40	
Rogowski Coil Size 01 - 200mV/kA - Shielded	RC01-200-S								25	
Rogowski Coil Size 01 - 300mV/kA	RC01-300	300	360	±1%	n.A.	150	25	0,2	35	
Rogowski Coil Size 01 - 300mV/kA - Shielded	RC01-300-S								25	
<b>RC03-SSS-LLLL-O</b>										
Rogowski Coil Size 03 - 200mV/kA	RC03-200-0250	200	240	±1%	250 ± 10	170	25	0,2	125	
Rogowski Coil Size 03 - 200mV/kA - Shielded	RC03-200-0250-S								50	
Rogowski Coil Size 03 - 400mV/kA	RC03-400-0250	400	480	±1%	250 ± 10	90	6	0,2	85	
Rogowski Coil Size 03 - 400mV/kA - Shielded	RC03-400-0250-S								45	
Rogowski Coil Size 03 - 600mV/kA	RC03-600-0250	600	720	±1%	250 ± 10	70	3	0,2	80	
Rogowski Coil Size 03 - 600mV/kA - Shielded	RC03-600-0250-S								45	
<b>RC05-SSS-LLLL-O</b>										
Rogowski Coil Size 05 - 150mV/kA	RC05-150-1000	150	180	±1%	1000 ± 20	110	28	0,2	140	
Rogowski Coil Size 05 - 150mV/kA - Shielded	RC05-150-1000-S								20	
Rogowski Coil Size 05 - 300mV/kA	RC05-300-1000	300	360	±1%	1000 ± 20	60	25	0,2	110	
Rogowski Coil Size 05 - 300mV/kA - Shielded	RC05-300-1000-S								40	
Rogowski Coil Size 05 - 450mV/kA	RC05-450-1000	450	540	±1%	1000 ± 20	45	21	0,2	80	
Rogowski Coil Size 05 - 450mV/kA - Shielded	RC05-450-1000-S								20	

## Rogowski - Current Sensor

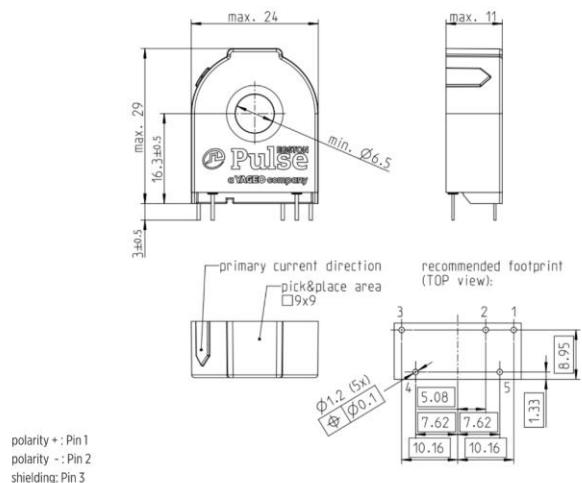
RC01-SSS-O Series  
RC03-SSS-LLLL-O Series  
RC05-SSS-LLLL-O Series



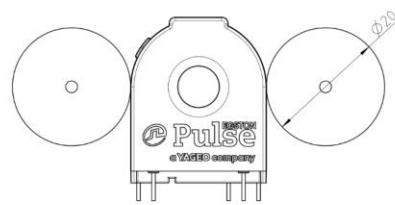
### Mechanicals

#### RC01-SSS-O

Weight: approx. 7g Dimensions in mm



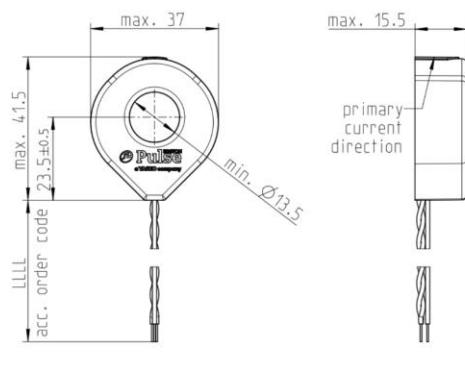
Test setup for external electromagnetic field current conductor is close to the housing with the specified diameter.



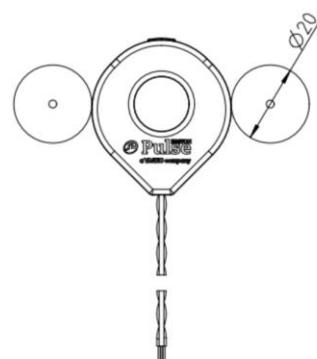
### Mechanicals

#### RC03-SSS-LLLL-O

Weight: approx. 23g (without cable) Dimensions in mm



Test setup for external electromagnetic field current conductor is close to the housing with the specified diameter.



## Rogowski - Current Sensor

RC01-SSS-O Series  
RC03-SSS-LLLL-O Series  
RC05-SSS-LLLL-O Series

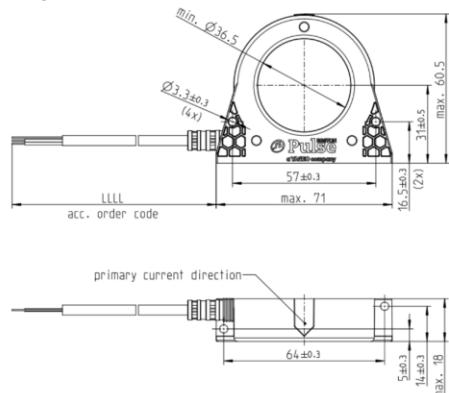


### Mechanicals

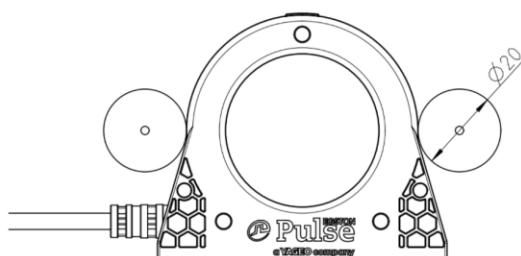
#### RC05-SSS-LLLL-O

Weight: approx. 48g Dimensions in mm  
(without cable)

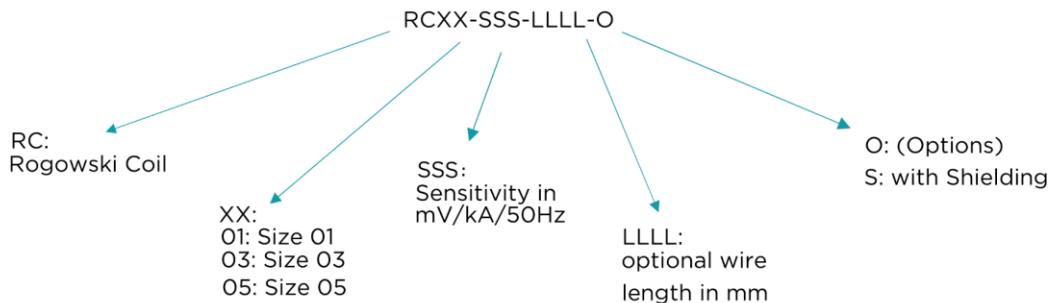
polarity + : red  
polarity - : black  
shielding: blank



Test setup for external electromagnetic field  
current conductor is close to the housing  
with the specified diameter.



### Codification



#### For More Information:

[info.egston@yageo.com](mailto:info.egston@yageo.com) | [www.pulseelectronics.eu](http://www.pulseelectronics.eu)

Performance warranty of products offered on this data sheet is limited to the parameters specified. Data is subject to change without notice. Other brand and product names mentioned herein may be trademarks or registered trademarks of their respective owners. © Copyright, 2021. Pulse Electronics, Inc. All rights reserved.



3

[pulseelectronics.eu](http://pulseelectronics.eu)

TSC0005\_02\_EN / 15.03.2023



## Mouser Electronics

Authorized Distributor

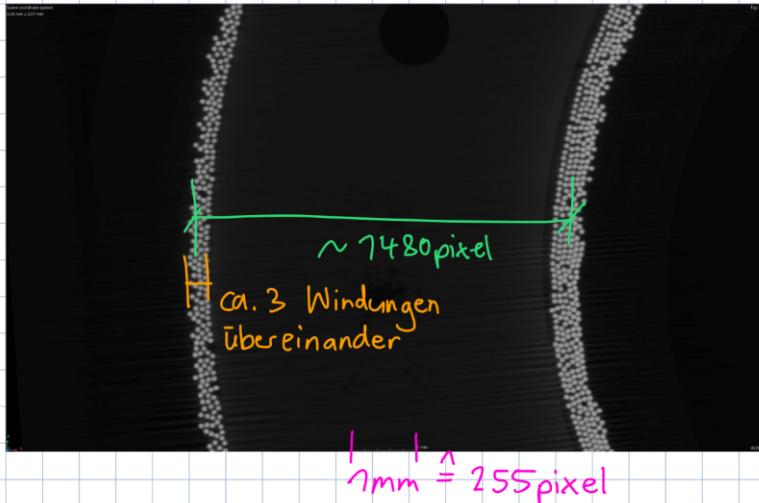
Click to View Pricing, Inventory, Delivery & Lifecycle Information:

Pulse:

[RC01-100](#) [RC01-100-S](#) [RC01-200](#) [RC01-200-S](#) [RC01-300](#) [RC01-300-S](#) [RC03-200-0250](#) [RC03-200-0250-S](#)  
[RC03-400-0250](#) [RC03-400-0250-S](#) [RC03-600-0250](#) [RC03-600-0250-S](#) [RC05-150-1000](#) [RC05-150-1000-S](#) [RC05-300-1000](#)  
[RC05-300-1000-S](#) [RC05-450-1000](#) [RC05-450-1000-S](#)

## 7.2 Diverse Berechnung

Berechnung n Windungen der gekauften Rogowski-Spule



→ Durchmesser mittels GIMP ermitteln...

⇒ ein Draht ca. 22 pixel

$$\frac{D}{1 \text{ mm}} = \frac{22 \text{ pixel}}{255 \text{ pixel}} \Leftrightarrow D = \frac{22 \text{ pixel}}{255 \text{ pixel}} \cdot 1 \text{ mm} \approx 86.28 \mu\text{m} \Rightarrow 0.08 \text{ mm}$$

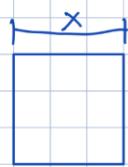
Annahme, Draht besteht aus Kupfer:

$$R_L = \frac{\rho \cdot l}{A} \Leftrightarrow L = \frac{R_L \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi}{\rho} = \frac{244 \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot \left(\frac{0.08 \text{ mm}}{2}\right)^2 \pi}{0.0175 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2}}$$

$$\approx 70.08 \text{ m} \Rightarrow 70 \text{ m} //$$

mit Multimeter gemessen

Annahme Wicklung quadratisch und nicht konzentrisch:

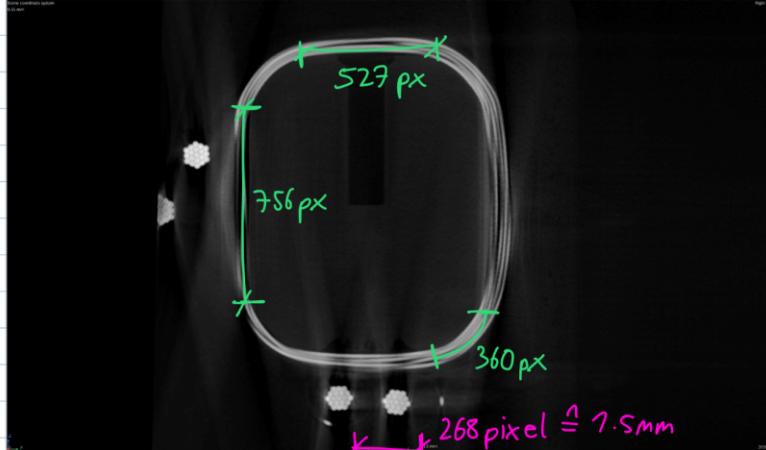


$$\frac{x}{1 \text{ mm}} = \frac{1480 \text{ pixel}}{255 \text{ pixel}} \Leftrightarrow x = \frac{1480 \text{ pixel}}{255 \text{ pixel}} \cdot 1 \text{ mm} \approx 5.8 \text{ mm}$$

$$n \text{ Windungen} \approx \frac{l}{4x} = \frac{70 \text{ m}}{4 \cdot 5.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx 3077 \text{ Windungen}$$

$$\Rightarrow \text{ca. 3000 Windungen}$$

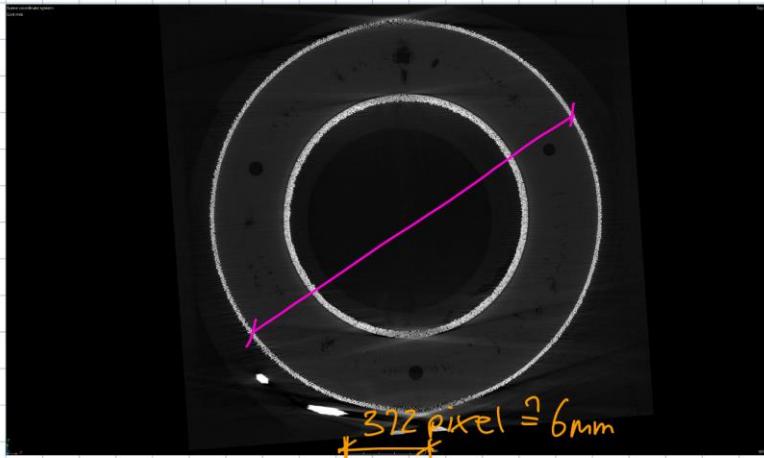
Ansatz Berechnung Windungen durch Leitungslänge:



$$U = \frac{(2 \cdot 756 \text{ px} + 2 \cdot 527 \text{ px} + 4 \cdot 360 \text{ px}) \cdot 7.5 \text{ mm}}{268 \text{ pixel}} \approx 22.42 \text{ mm}$$

$$n_{\text{Windungen}} = \frac{l}{U} = \frac{70 \text{ m}}{22.42 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx 3122 \text{ Windungen} //$$

Ansatz Berechnung Windungen durch  $\phi$  der Spule:



$$\phi_{px} = 1550 \text{ pixel}$$

$$\phi_{mm} = \frac{\phi_{px}}{\frac{372 \text{ px}}{6 \text{ mm}}} = \frac{1550 \text{ pixel} \cdot 6 \text{ mm}}{372 \text{ pixel}} \approx 29.87 \text{ mm}$$

$$U = 2\pi r = 2\pi \frac{D}{2} = \pi \cdot D = \pi \cdot 29.87 \text{ mm}$$

$$\approx 93.64 \text{ mm}$$

$$n_{\text{Windungen}} = n_{\text{Lagen}} \cdot \frac{U}{\phi_{\text{draht}}} = 3 \cdot \frac{93.64 \text{ mm}}{0.08 \text{ mm}} = 3572 \text{ Windungen} //$$

$\Rightarrow$  Die Anzahl Windungen beider Ansätze liegt zwischen 3722 und 3572 Windungen.

$$\frac{3722 + 3572}{2} = 3379 \text{ Windungen als Durchschnitt} //$$

Rogowski-Spule

$$R_i \approx 244 \Omega$$

$l = 2\pi R$  length of the winding

$$u(t) = \frac{-A \cdot N \cdot M_0}{l} \cdot \frac{dI(t)}{dt} \Rightarrow \text{voltage produced by rogowski coil}$$

$$f_{\text{resonance}} = 70 \text{ kHz}$$

Verhältnis:  $600 \text{ mV} / \text{kA}$

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} \Leftrightarrow C = \frac{1}{f_g \cdot 2\pi \cdot R_i} = \frac{1}{70 \text{ kHz} \cdot 2\pi \cdot 244 \Omega} \approx 9.32 \text{ nF}$$

$$u(t) = M \cdot \frac{dI(t)}{dt}$$

$$0.6 \text{ V} = M \cdot \frac{1000 \text{ A}}{20 \text{ ms}} \Leftrightarrow M \Big|_{f=50 \text{ Hz}}$$

Induktivität der Spule bei 50Hz!

$$= \frac{0.6 \text{ V} \cdot 20 \text{ ms}}{1000 \text{ A}} = 72 \mu\text{H}$$

$$M \Big|_{f=60 \text{ Hz}} = \frac{0.72 \text{ V} \cdot 16.6 \text{ ms}}{1000 \text{ A}} = 72 \mu\text{H}$$

$\Rightarrow$  Induktivität bleibt immer gleich, Linearer Verhalt der  $600 \text{ mV/kA}$ !  
 ↳ frei von Nichtlinearitäten...

$$u(20 \text{ ms}) = M \cdot \frac{dI(20 \text{ ms})}{dt} = 72 \mu\text{H} \cdot \frac{1 \text{ A}}{20 \text{ ms}} = 600 \text{ mV}$$

Berechnung Spannung Rogowski

$$I_{\text{Last}} = 2 \text{ A} ; \quad U_{\text{OP2-PP}} = 0.589 \text{ V}$$

$$U_{\text{OP2-P}} = \frac{1}{2} U_{\text{OP2-PP}} = 0.2945 \text{ V}$$

$$H_1 = 4.03$$

$$H_2 = 666.6$$

$$U_{\text{OP1-P}} = \frac{U_{\text{OP2-P}}}{H_2} = \frac{0.2945 \text{ V}}{666.6} \approx 441.75 \mu\text{V}$$

$$U_{\text{Rog-P}} = \frac{U_{\text{OP1-P}}}{H_1} = \frac{441.75 \mu\text{V}}{4.03} \approx 109.62 \mu\text{V}$$

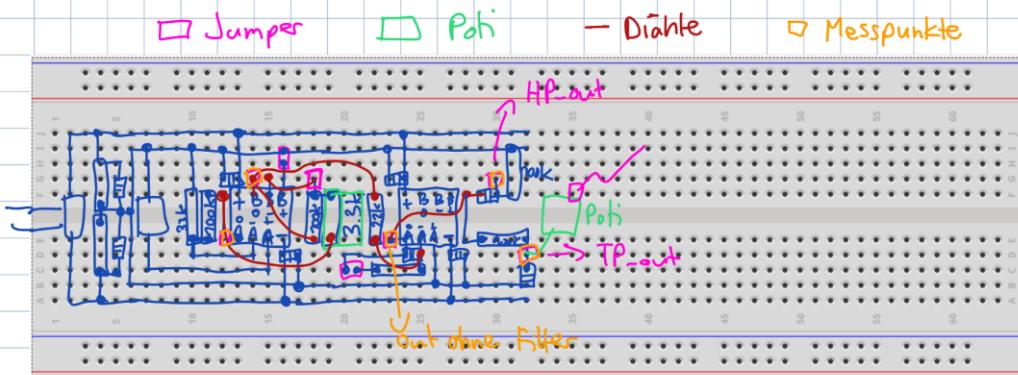
$$U_{\text{Rog-RMS}} \Big|_{I=2\text{A}} = \frac{U_{\text{Rog-P}}}{\sqrt{2}} \approx 77.57 \mu\text{V} \quad // \quad \rightarrow \text{RMS-Wert der Rogowski-Spule bei } 2\text{A} (2 \times \text{um den Leiter} = 4\text{A})$$

$$G_{\text{tot}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{U_{\text{OP2-P}}}{U_{\text{Rog-P}}} \right) = 20 \cdot \lg \left( \frac{294.5 \mu\text{V}}{109.62 \mu\text{V}} \right) \approx 68.59 \text{ dB} \quad //$$

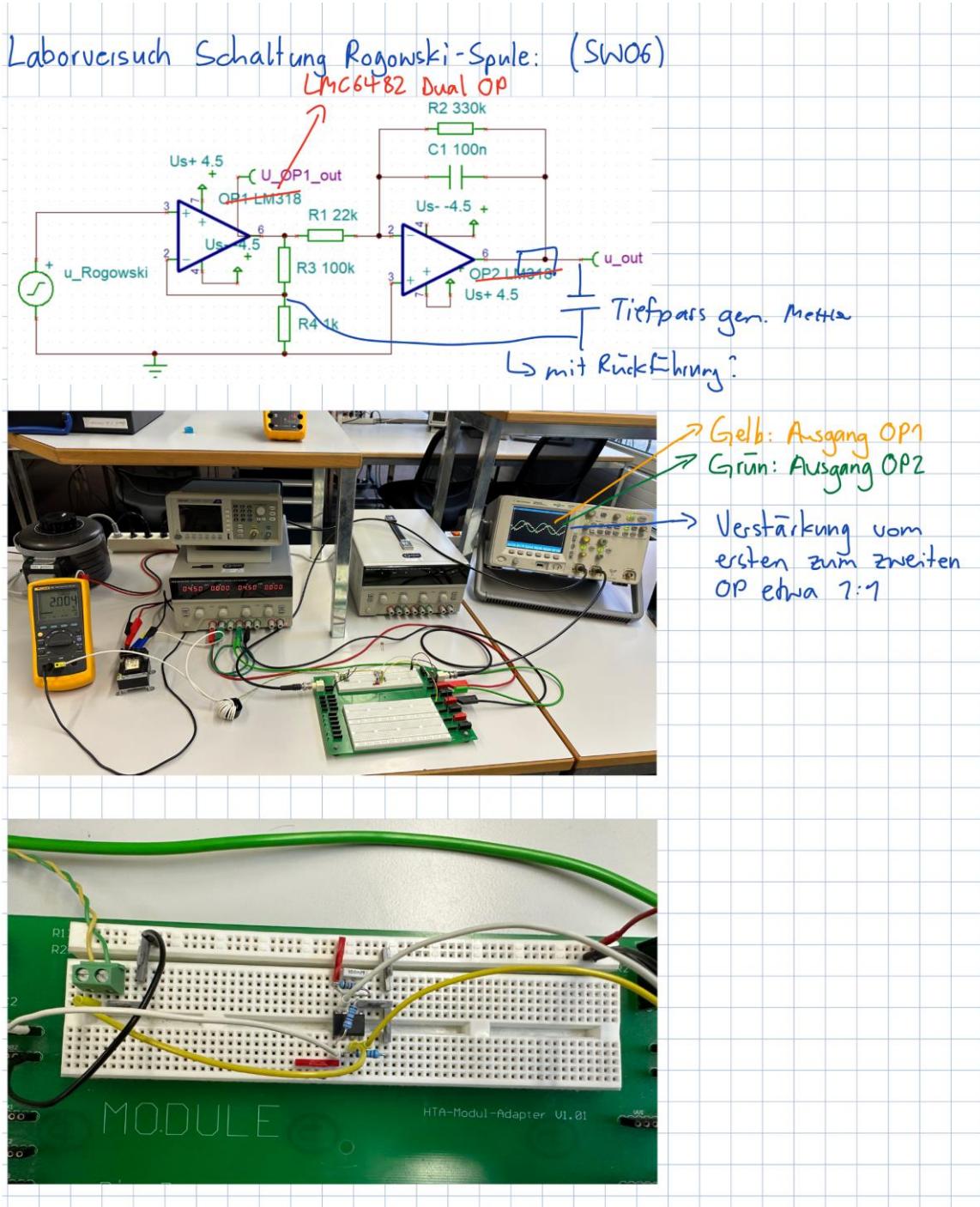
↓  
Totale Verstärkung ohne Integrator!

## 7.3 Diverse Notizen

Schaltung Rogowski auf Laborkarte



↳ Laborkarte mit etwa 74 x 40 Löcher



Derselbe Versuch mit der DIY-Spule:

- viel höhere Verstärkung notwendig
- C7 auf 10n verkleinert (erhöhte Verstärkung von OP2)
- R4 auf 100Ω verkleinert (erhöhte Verstärkung von OP1)