



Erzeugung HVDC (Greinacher) Lab #3

227-0117-10L: MESS- & VERSUCHSTECHNIK

Präsentiert von: Andri Furrer, Thorbjörn Höllwarth, Sean Heller

Begleitet von: Prof. Dr. Christian M. Franck
Henning Janssen, Philipp Simka, Ondrej Sefl

März, April 2022

1 Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Inhaltsverzeichnis..... | 2 |
| 2 | Versuchsziel & -ablauf | 3 |
| 3 | Einführung und Vorbereitung | 3 |
| 3.1 | Theorie | 3 |
| 3.1.1 | Unbelastete Greinacherkaskade | 3 |
| 3.1.2 | Belastete Greinacherkaskade | 4 |
| 3.1.3 | Spannungsrippel | 4 |
| 3.1.4 | Messunsicherheit..... | 4 |
| 3.2 | Untersuchung am Simulationsmodell..... | 5 |
| 3.2.1 | Messunsicherheit..... | 6 |
| 3.2.2 | Maximale Eingangsspannung..... | 6 |
| 3.2.3 | Zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung und Zwischenabgriffe..... | 7 |
| 3.2.4 | Spannungsabfall und Rippel..... | 8 |
| 3.3 | Messungen mit der Kaskade | 9 |
| 3.3.1 | Versuchsaufbau..... | 9 |
| 4 | Messprotokoll am 31.03.2022 | 10 |
| 4.1 | Beschreibung der Gerätschaften | 10 |
| 4.1.1 | Sicherheitskreis | 10 |
| 4.1.2 | HVAC Transformator | 10 |
| 4.1.3 | Tastkopf - TESTEC TT-HVP 15HF | 10 |
| 4.1.4 | Labornetzteil - GW Instek GPS-3303S | 10 |
| 4.1.5 | Oszilloskop - Agilent MSOX3014A (4 Kanäle, 100 MHz und 2GSa/s)..... | 10 |
| 4.2 | Aufbau..... | 11 |
| 4.2.1 | Messaufbau HVAC Trafo | 11 |
| 4.2.2 | Messaufbau unbelastete Greinacherkaskade..... | 11 |
| 4.2.3 | Messaufbau belastete Greinacherkaskade..... | 12 |
| 4.3 | Übersetzungsverhältnis | 13 |
| 4.4 | Messungen an der unbelasteten Greinacherkaskade | 13 |
| 4.5 | Messungen an der belasteten Greinacherkaskade..... | 13 |
| 4.6 | Messungen an der variiert belasteten Greinacherkaskade | 13 |
| 5 | Ergebnisblatt..... | 14 |
| 5.1 | Messunsicherheiten..... | 14 |
| 5.2 | Übersetzungsverhältnis des HVAC Transformators..... | 15 |
| 5.3 | Unbelastete Greinacherkaskade..... | 15 |
| 5.4 | Belastete Greinacherkaskade | 16 |
| 6 | Diskussion | 18 |
| 6.1 | Belastete und unbelastete Greinacherkaskade | 18 |
| 6.2 | Rippel | 18 |
| 6.3 | Spannungsabfall | 18 |
| 7 | Eigenständigkeitserklärung..... | 19 |

2 Versuchsziel & -ablauf

Mit Hilfe einer Greinacherkaskade¹ erzeugte hohe Gleichspannungen sollen im belasteten und unbelasteten Fall untersucht werden. Dazu wird eine Mischung von experimentellen Messungen und idealer Simulation verwendet.

3 Einführung und Vorbereitung

Anhand der Simulation wird die maximale Ausgangsspannung bestimmt damit diese die Isolationsspannung von 15 kV nicht überschreitet. Weiter soll der zeitliche Verlauf der Ausgangsspannung und aller Zwischenabgriffe gegen Erde für eine 100 MΩ Last, bei einer Ausgangsspannung von 13.5 kV und 33 kHz Frequenz bestimmt werden. Zudem soll die Abhängigkeit des Spannungsabfalls ΔU und des Rippels δu als Funktion der Eingangsfrequenz im Bereich von 1 kHz bis 50 kHz für eine Last von 10 MΩ gezeichnet und mit den berechneten Werten verglichen werden. Nach einer Unsicherheitsbetrachtung wird der zeitliche Verlauf der Spannung am Ausgang und sämtlicher Zwischenabgriffe unbelastet sowie belastet mit der realen Schaltung gemessen. Untersucht werden sollen nicht nur die Veränderung vom belasteten zum unbelasteten Fall, sondern auch von der realen Schaltung zur Simulation. Zuletzt soll der Spannungsabfall ΔU und der Rippel δu für drei verschiedene Lasten 100 MΩ, 50 MΩ und 10 MΩ für zwei verschiedene Greinacherkaskaden (1 nF beziehungsweise 10 nF) bestimmt werden.

3.1 Theorie

3.1.1 Unbelastete Greinacherkaskade

Im unbelasteten Fall führt die Greinacherkaskade mit einer Anzahl n Schubstufen zu einer n -fachen Vervielfachung des Spitzenwertes der Eingangsspannung, sodass am Ausgang eine Spannung $U_g = 2n\hat{u}$ abfällt. Es handelt sich dabei um Gleichspannung, die durch die Glättungsstufe zustande kommt. Es kommen pro Stufe je 2 Dioden und ein Schub- und Glättungskondensator zum Einsatz.

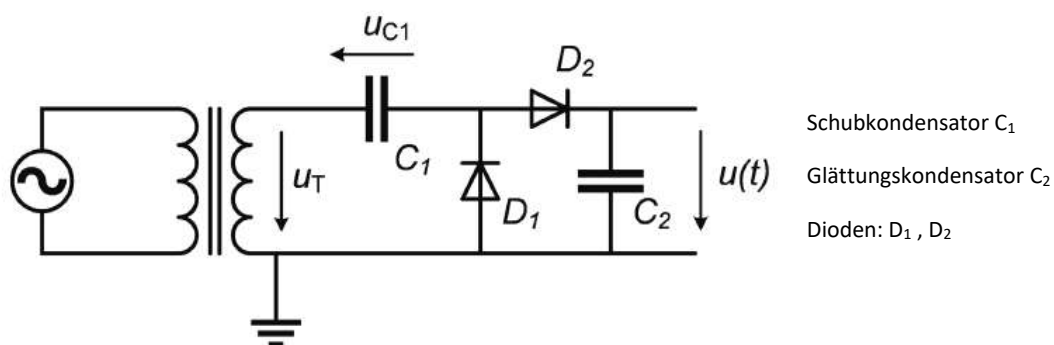


Abbildung 1: Einstufige, unbelastete Greinacherschaltung

¹ Die Greinacher-Schaltung ist eine Weiterentwicklung des Spannungsverdopplers (Ladungspumpe), die die ausgangsseitige Spitzenspannung der Villard-Schaltung durch eine zusätzliche Diode D_2 und einen Speicherkondensator C_2 erweitert und damit eine Gleichspannung mit vergleichsweise geringem Rippelstrom liefert.

[Wikipedia: „Spannungsverdoppler“. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Spannungsverdoppler&oldid=206962862> (Abgerufen: 28. März 2022, 16:25 UTC)]

3.1.2 Belastete Greinacherkaskade

Ist die Greinacherkaskade belastet kommt es zu einer Verminderung der Gleichspannung die über den Ausgang abfällt. Dabei sind sämtliche Kondensatoren gleich gross und \bar{i} ist der mittlere Strom durch die Last.

$$U_{DC} = 2 n \hat{u} - \frac{\bar{i}}{fC} \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12}$$

3.1.3 Spannungsrippel

Die Welligkeit oder auch Rippel genannt berechnet sich aus dem Maximalwert minus Minimalwert der Spannung. Durch Teilung mit dem Spannungsabfall bildet sich der Welligkeitsfaktor. Dieser kommt zustande, da der in der Gleichrichterschaltung zuständige Glättungskondensator nicht ideal ist.

$$\delta u = \frac{1}{2} (u_{max} - u_{min}) = \frac{\bar{i}}{fC} \frac{n(n+1)}{4}$$

$$\frac{\delta u}{U_{DC}} = \frac{1}{2U_{DC}} (u_{max} - u_{min})$$

3.1.4 Messunsicherheit

Die allgemeine Standardunsicherheit der Spannung berechnet sich zu:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2}$$

Und der Erwartungswert folgendermassen:

$$U_m = 2 * u.$$

3.2 Untersuchung am Simulationsmodell

Für die Simulation wird das gegebene Template zur Schaltung der zweistufigen Greinacherkaskade in *LTspice XVII*² bearbeitet. Sämtliche Parameter können passend eingestellt werden. Spannungen können über den einzelnen Bauteilen abgegriffen werden. Es ist anzumerken, dass sich sämtliche Bauteile ideal verhalten. Insbesondere muss darauf geachtet werden, dass die genau Last korrekt angeschlossen ist.

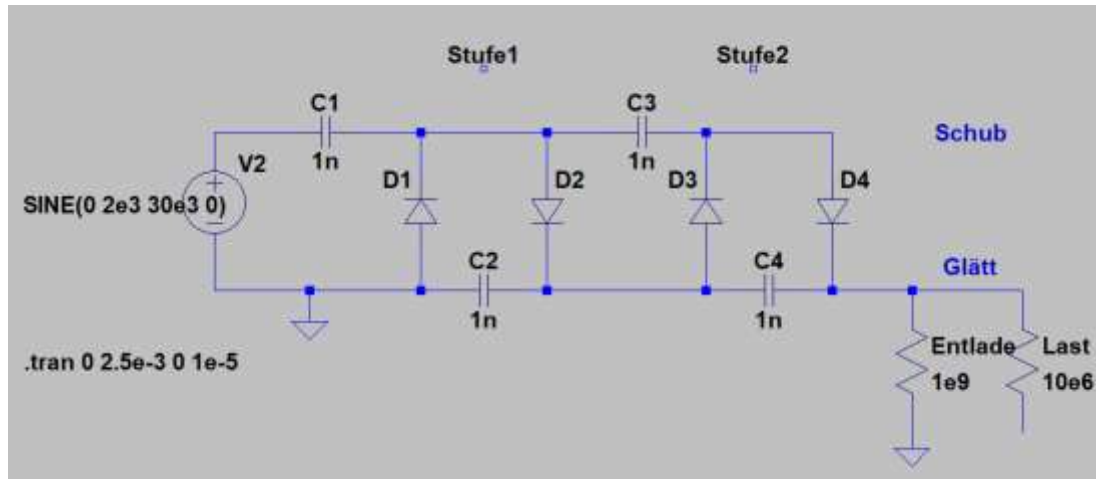


Abbildung 2: Zweistufige Greinacherkaskade (Simulationssoftware LTspice XVII)

Das gegebene Template besteht aus folgenden idealen Bauteilen:

- Eine AC-Spannungsquelle: sinusförmige Eingangsquelle, mit einer Frequenz von 30 kHz und einer Amplitude von 2 kV.
- Zwei Schubkondensatoren C_1 und C_3 mit Kapazitäten 1 nF.
- Zwei Glättungskondensatoren C_2 und C_4 mit Kapazitäten 1 nF.
- Vier Dioden D_1 , D_2 , D_3 und D_4 mit einer Durchbruchspannung von 75 V und einem durchschnittlichen Durchlassstrom von 0.2 A.
- Einem Entladewiderstand $R_1 = 1 \text{ G}\Omega$
- Einem Lastwiderstand $R_2 = 10 \text{ M}\Omega$

² LTspice® is a high performance SPICE simulation software, schematic capture and waveform viewer with enhancements and models for easing the simulation of analog circuits. Included in the download of LTspice are macromodels for a majority of Analog Devices switching regulators, amplifiers, as well as a library of devices for general circuit simulation. [<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>. Abgerufen am 29.03.2022]

3.2.1 Messunsicherheit

Für das Ablesen der Ausgangsspannung für die Berechnung der maximalen Eingangsspannung in der Simulation, wurden Hilfslinien und die Zoomfunktion verwendet und danach die von Auge am nächsten liegende Spannungslinie verwendet. Die dadurch entstandene Ungenauigkeit schätzen wir auf $\pm 2\%$. Das Ergebnis wurde anschliessend durch eine analytische Betrachtung überprüft.

3.2.2 Maximale Eingangsspannung

Um am Ausgang die maximale Spannung von 15 kV nicht zu überschreiten, dürfen wir bei einer Eingangsfrequenz von 33 kHz und der vorliegenden zweistufigen Greinacherkaskade laut Formel

$$U_{out,GK,DC} = 2 n \hat{u}$$

maximal 3.75 kV am Eingang anlegen. Dies ist in Abb. 3 sehr gut zu erkennen.

Bemerkung: Von der Ausgangslage angepasste Elemente:

- Eingangsfrequenz von 30 kHz auf 33 kHz erhöht.
- Lastwiderstand von 10 M Ω auf 100 M Ω erhöht.
- Erd-Potenzial hinter Lastwiderstand hinzugefügt.

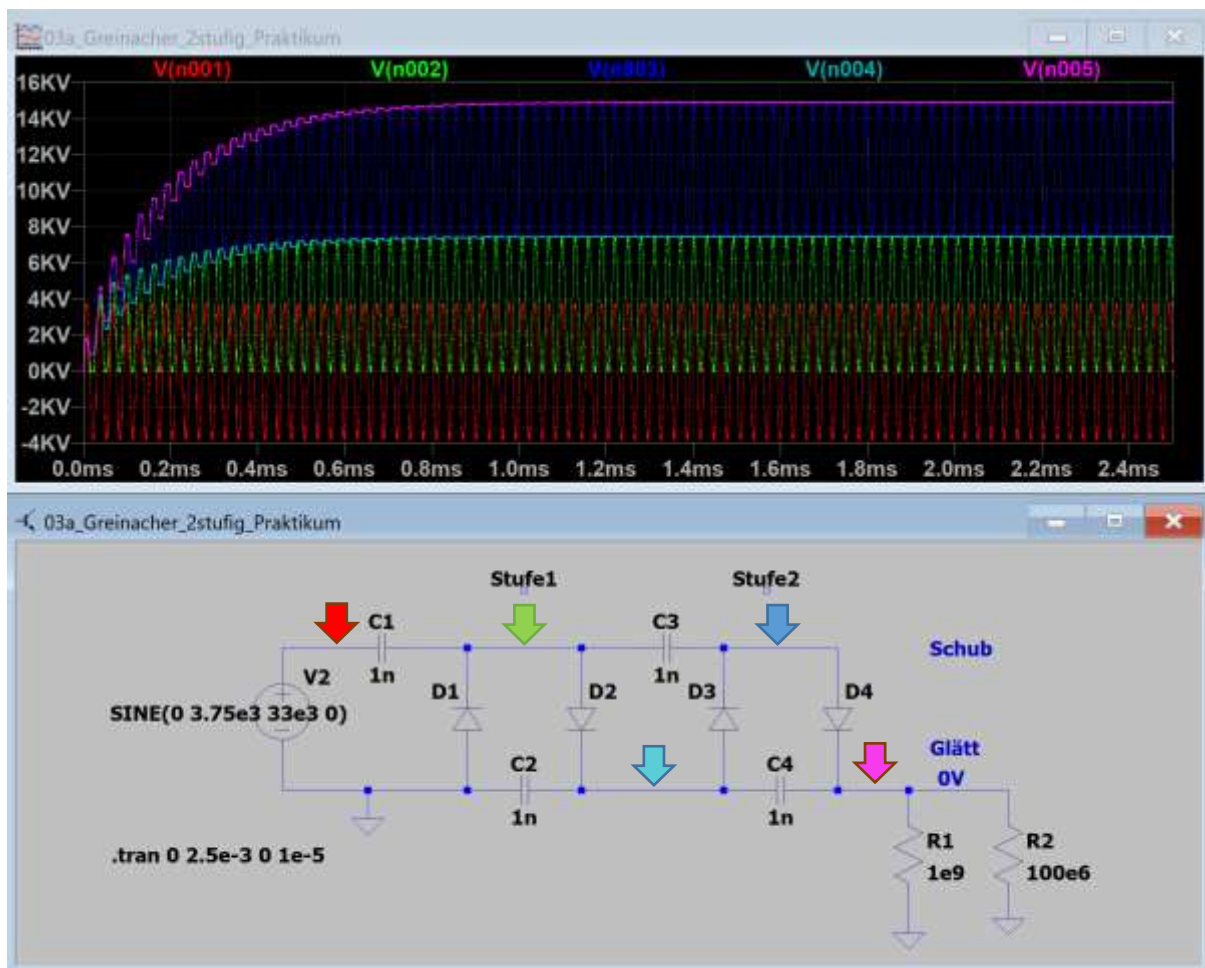


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung im eingeschwungenen Zustand

3.2.3 Zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung und Zwischenabgriffe

Ziel nun ist es, bei einer Last von 100 MΩ und einer Ausgangsspannung von 13.5 kV und 33 kHz treibender Frequenz, den zeitlichen Verlauf der Ausgangsspannung und einiger Zwischenabgriffe darzustellen. Zunächst müssen wir die Eingangsspannung berechnen:

$$\hat{u} = \frac{1}{2n} * \left(U_g + \frac{U_g}{f R_L C} * \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12} \right) = 3.384 \text{ kV}$$

wobei die beiden parallelen Widerstände wie folgt zusammengefasst wurden

$$R_L = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 9.091 * 10^7 \Omega$$

Nachdem die korrekten Werte berechnet und in die Simulation übernommen wurden, ergaben sich folgende, jeweils zum Erd-Potenzial abgegriffene Spannungen.

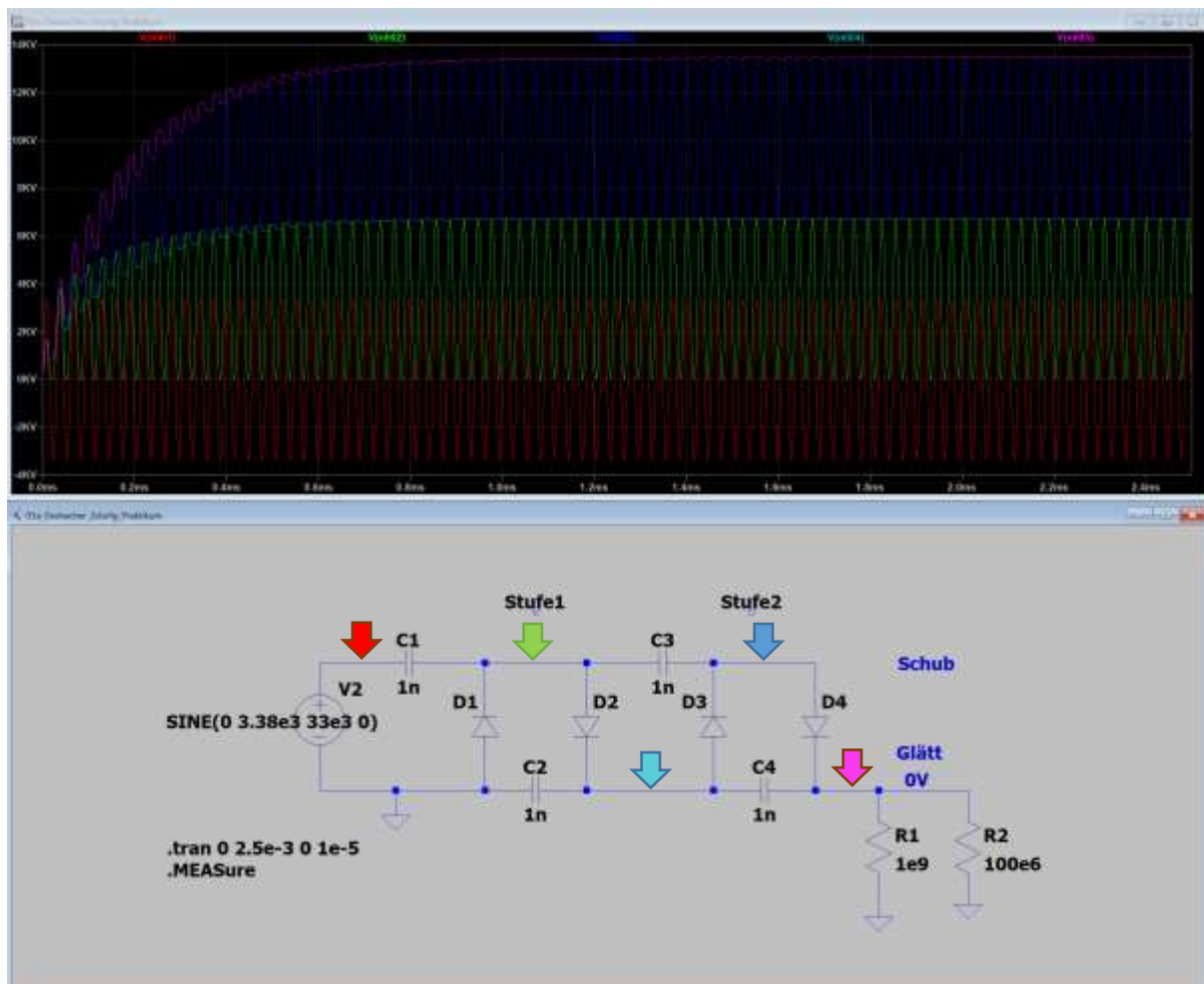


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung und einiger Zwischenabgriffe

3.2.4 Spannungsabfall und Rippel

Der Spannungsabfall ΔU sowie der Rippel δu sind jeweils umgekehrt proportional zur Frequenz. Dies liegt daran, dass jeweils mit der Frequenz dividiert wird. So sind bei hohen Frequenzen kleine Werte für ΔU sowie δu zu erwarten.

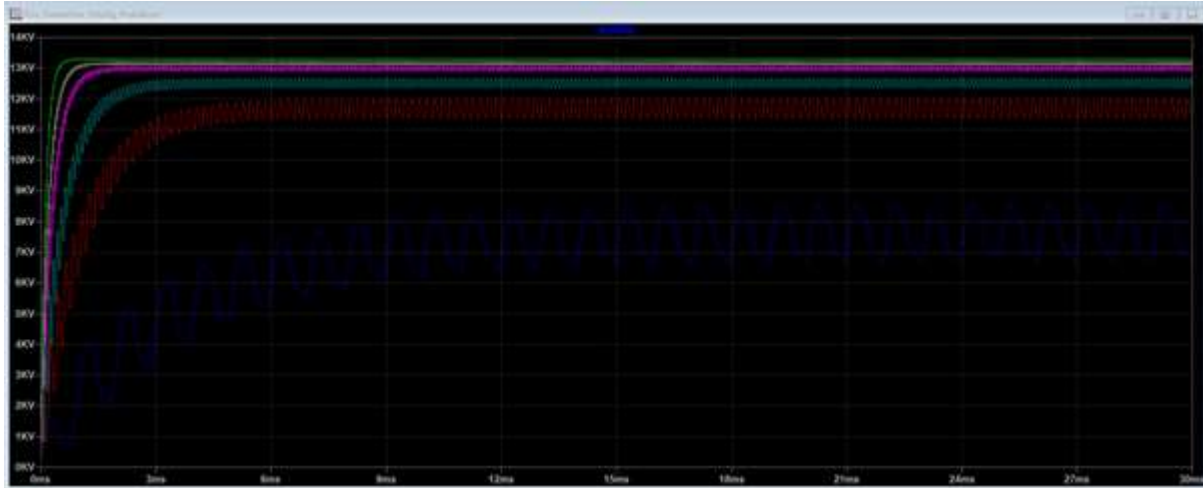


Abbildung 5: Ausgangsspannung bei unterschiedlichen Eingangsfrequenzen (Blau: 1 kHz, Rot: 5 kHz, Türkis: 10 kHz, Pink: 20 kHz, Grau: 30 kHz, Grün: 50 kHz)

In Abb. 5 ist gut ersichtlich, dass sich die niedrigen Frequenzen von 1 kHz bis 10 kHz, nach dem vordefinierten Zeitfenster von 2.5 ms, nicht genügend Zeit hatten, sich einzuschwingen. Für die unterste Frequenz $f = 1 \text{ kHz}$ ist dies erst nach 15 ms der Fall. Dies bedeutet, je höher die Eingangsfrequenz, desto kürzer die Einschwingzeit des Systems.

3.3 Messungen mit der Kaskade

3.3.1 Versuchsaufbau

Die benötigte Eingangsspannung wird durch den im vorherigen Versuch behandelten AC-Hochspannungstransformator zur Verfügung gestellt. Da die Ausgangsspannung die 15 kV nicht überschreiten darf, dürfen maximal 3.75 kV angelegt sein. Der Transformator wird mit einer DC-Spannungsquelle versorgt und der Output wird an den Eingang der Greinacherkaskade angeschlossen. Gemessen wird die Eingangsspannung sowie die Ausgangsspannung der Kaskade.

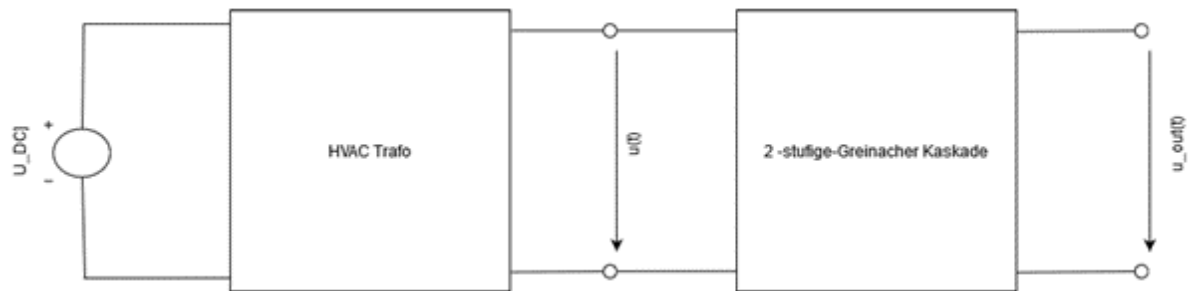


Abbildung 6: Schematischer Versuchsaufbau

Für den belasteten Fall wird ein 100 M Ω Widerstand am Ausgang angelegt und wiederum die Eingangs- und Ausgangsspannung gemessen.

4 Messprotokoll am 31.03.2022

4.1 Beschreibung der Gerätschaften

Für den Versuch wurden die folgenden Gerätschaften verwendet. Da der HVAC Transformator bereits im letzten Versuch genauer erklärt wurde, wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

4.1.1 Sicherheitskreis

Eine Haube wird dafür verwendet, welche über eine zweistufige Ein- und Ausschaltung verfügt. Spannungen können über zwei Kanäle mittels Sicherheitsbananenstecker potentialfrei zugeschaltet werden. Zwei Hochspannungsköpfe sind fest verbaut.

4.1.2 HVAC Transformator

Die Messunsicherheit, welche sich aus dem Transformator ergibt, bezieht sich auf das charakteristische Übersetzungsverhältnis des gerade verwendeten Transformators und wird mittels Anlegung verschiedener DC Eingangsspannungen ermittelt (Typ A³).

$$\ddot{u}_{Trafo} = \frac{\hat{u}_{AC,out,Trafo} * \frac{1}{\sqrt{2}}}{U_{DC,in,Trafo}}$$

4.1.3 Tastkopf - TESTEC TT-HVP 15HF⁴

Die beiden fest verbauten, hochohmigen (100 MΩ und 1 pF) Tastköpfe in der Sicherheitshaube sind an den Eingang des Oszilloskops angeschlossen und haben dann ein Teilverhältnis von 1'000:1. Ganz wichtig ist, dass die maximale Eingangsspannung von 15 kV nicht überschritten werden darf.

Die Messunsicherheit beläuft sich auf 0.02% ± 5 mV (Typ B⁵)

4.1.4 Labornetzteil - GW Instek GPS-3303S

Das Labornetzteil fungiert als DC-Quelle und liefert die Eingangsspannung für den HVAC Transformator. Da dessen Anlaufstrom relativ gross ist, muss das Labornetzteil im «CH1/CH2 Tracking Parallel Mode» betrieben werden. So kann eine Reichweite von 0 – 30 V und 0-6 A zur Verfügung gestellt werden.

4.1.5 Oszilloskop - Agilent MSOX3014A⁶ (4 Kanäle, 100 MHz und 2GSa/s)

Laut Versuchsanleitung beläuft sich die Messungenauigkeit des Oszilloskops zusammen mit den oben genannten Tastköpfen zu ±6%. Dabei ist also die Messungenauigkeit des Tastkopfs mitenthalten.

Auf die kombinierte Standardunsicherheit wird im Abschnitt Ergebnisse näher eingegangen.

³ Typ A: Empirische Standardabweichung aus Wiederholungsmessungen

⁴ https://www.testec.de/assets/pdf/TT-HVP/TT-HVP-15HF_Datasheet_DE.pdf, abgerufen am 5.4.2022

⁵ Typ B: Angaben aus anderen Informationsquellen. Hier Gerätespezifikation

⁶ <https://www.keysight.com/ch/de/assets/7018-02734/data-sheets/5990-6619.pdf>, abgerufen am 6.4.2022

4.2 Aufbau

4.2.1 Messaufbau HVAC Trafo

Der linke Teil von Abb. 6 wird, der HVAC Transformator, wird wie in Abb. 7 in die Realität umgesetzt. Zusätzlich (nicht im Bild) wird der Sicherheitskreis gespiesen von dem Labornetzteil und Tastkopf 1 ist mit dem Oszilloskop verbunden. Des Weiteren haben wir uns entschieden, nur 4 der 6 geplanten Messungen durchzuführen, da wir durch den letzten Versuch für den Output (respektive für \ddot{u}) eine lineare Entwicklung erwarten konnten. Die Messwerte sind unter "3.3 Übersetzungsverhältnis" ersichtlich



Abbildung 7: Versuchsaufbau DC/HVAC Transformator im Sicherheitskreis

4.2.2 Messaufbau unbelastete Greinacherkaskade

Abb.6 wird unbelastet und vollständig wie in Abb. 8 gezeigt für die Messreihen in die Realität umgesetzt. Auch hier wird der Sicherheitskreis mit dem Labornetzteil gespeist und Tastkopf 1 wird mit der HVDC Klemme, also dem Output der Greinacherkaskade und Tastkopf 2 mit dem HVAC Output des Trafos, respektive dem Input der Greinacherkaskade verbunden. Beide Tastköpfe sind für das Durchführen der Messungen an das Oszilloskop angeschlossen. Die dazugehörigen Messwerte sind unter "3.4 Messungen an der unbelasteten Greinacherkaskade" tabelliert.

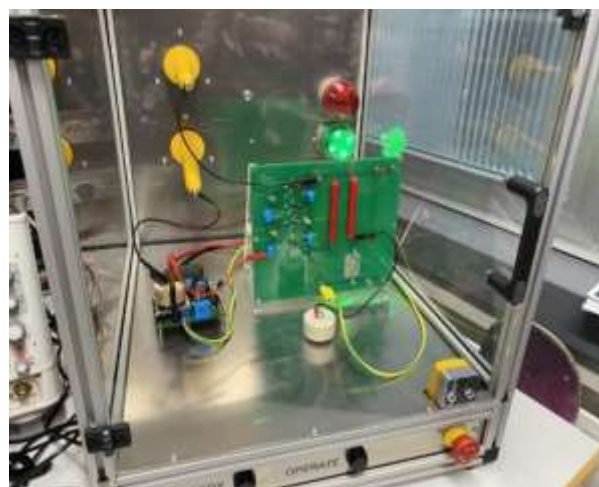


Abbildung 8: Versuchsaufbau unbelasteter Greinacherkaskade

4.2.3 Messaufbau belastete Greinacherkaskade

Der Versuchsaufbau ist gleich wie in 3.2.2, wird jedoch zusätzlich mit einem HV-Widerstand belastet (hier mit 100M Ω). Ebenso sind die Messwerte unter "3.5 Messungen an der belasteten Greinacherkaskade" zu finden.

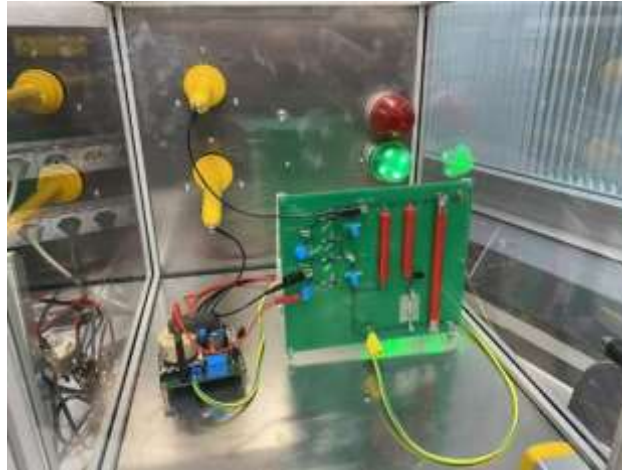


Abbildung 9: Versuchsaufbau belastete Greinacherkaskade

4.3 Übersetzungsverhältnis

| Mess-ID | Input | $U_{out,RMS}$ in kV | Std-Dev. in V | \ddot{u} |
|----------------|--------------|---------------------------------------|----------------------|------------------------------|
| 1 | 9.77 | 1.42 | 148 | 145.342886 |
| 2 | 11.78 | 1.76 | 53 | 149.405772 |
| 4 | 16 | 2.3 | 20 | 143.75 |
| 6 | 20 | 2.87 | 17 | 143.5 |
| | | | Mittelwert | 145.499665 |

Table 1: Messtabelle für die Berechnung des gemittelten Übersetzungsverhältnisses

4.4 Messungen an der unbelasteten Greinacherkaskade

| Abgriffstelle an GK | Last in MΩ | $U_{in,mean}$ in V | $U_{out,pp}$ in kV | RMS in kV | Std-Dev. in V |
|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------|----------------------|
| Schub 1 | 0 | 17.152 | 13.489 | 2.409 | 0,786 |
| Schub 2 | 0 | 17.241 | 13.494 | 2.411 | 2,076 |
| Glätt 1 | 0 | 17.429 | 13.5 | 0.0223 | 20,267 |

Table 2: Messtabelle für die unbelastete Greinacherkaskade

4.5 Messungen an der belasteten Greinacherkaskade

| Abgriffstelle an GK | Last in MΩ | $U_{in,mean}$ in V | $U_{out,pp}$ in kV | RMS in V | Std-Dev. in V |
|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------------|
| Schub 1 | 100 | 14.75 | 13.463 | 2.068 | 325.51 |
| Schub 2 | 100 | 17.203 | 13.408 | 2.391 | 2.7795 |
| Glätt 1 | 100 | 17.53 | 13.38 | 86.45 | 13.258 |

Table 3: Messtabelle für die belastete Greinacherkaskade

4.6 Messungen an der variiert belasteten Greinacherkaskade

| Mess-ID | Kapazitäten in nF | Last in MΩ | $U_{in,Lab,DC}$ in V | $U_{out,Trafo,RMS}$ in kV | $U_{out,GK,max}$ in kV | $U_{out,GK,mean}$ in kV | Std-Dev. in V | $Rippel_{mean}$ in V | Std-Dev. in mV |
|----------------|--------------------------|-------------------------------------|--|---|--|---|----------------------|--|-----------------------|
| 1 | 1 | 10 | 17.638 | 2.5231 | 13.5 | 13.282 | 8.0729 | 155.13 | 494.29 |
| 2 | 1 | 50 | 17.538 | 2.512 | 13.455 | 13.427 | 9.349 | 71.155 | 449.96 |
| 3 | 1 | 100 | 17.111 | 2.466 | 13.483 | 13.457 | 29.358 | 60.11 | 537.91 |
| 4 | 10 | 10 | 17.503 | 2.5387 | 13.468 | 13.446 | 8.841 | 80.03 | 171.02 |
| 5 | 10 | 50 | 17.062 | 2.4692 | 13.491 | 13.478 | 4.549 | 39.705 | 457.19 |
| 6 | 10 | 100 | 16.95 | 2.4662 | 13.445 | 13.448 | 2.8335 | 33.404 | 80.1 |

Table 4: Messtabelle für die variiert belastete Greinacherkaskade

5 Ergebnisblatt

Folgend sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Sämtliche Messunsicherheiten werden mit $\pm 6\%$ angegeben. Dies gilt, da der Tastkopf zusammen mit dem DSO betrieben wird. Weitere Informationen dazu finden sich in der Versuchsanleitung.

5.1 Messunsicherheiten

Für die Messunsicherheit haben wir gemäss der folgenden Gleichung

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2}$$

die vertikale Ungenauigkeit des Oszilloskops zu betrachten

$$\Delta u_{vg} = 0.02 * \text{Messbereich} * \frac{1}{\sqrt{3}}$$

sowie die Quantisierungsunsicherheit

$$e_q = \frac{U_{max}}{2^8}$$

Dies führt zur allgemeinen Unsicherheit, mit welcher die Messunsicherheiten im folgenden Abschnitt berechnet wurden.

$$\Delta U = \sqrt{s^2 + \Delta u_q^2 + \Delta u_{vg}^2}$$

5.2 Übersetzungsverhältnis des HVAC Transformators

Da die verwendeten HVAC Transformatoren nicht alle baugleich sind und somit unterschiedliche Übersetzungsverhältnisse aufweisen, wurde vor den Hauptmessungen der für dieses Lab verwendete Transformator auf sein Übersetzungsverhältnis überprüft.

Dazu wurden verschiedene Eingangsspannungen U_{DC} im Bereich von 9 bis 20 Volt angelegt und die Entsprechende Ausgangsspannung gemessen. Das Übersetzungsverhältnis wurde dann wie folgt berechnet:

$$\ddot{u} = \frac{U_{DC,out,RMS}}{U_{DC,input}}$$

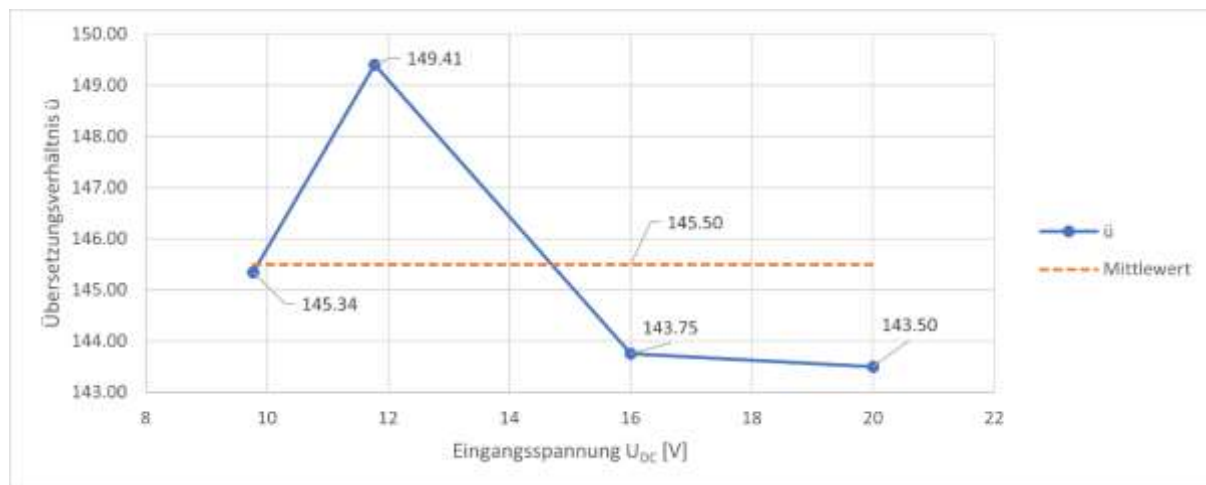


Abbildung 10: Übersetzungsverhältnis des HVAC Transformators

Dabei ergab sich für das Übersetzungsverhältnis ein Mittelwert von 145.50.

5.3 Unbelastete Greinacherkaskade

| Kondensator C_i ($i = 1, 2, 3, 4$) | Last in $M\Omega$ | $U_{in,Lab,DC}$ in V | $U_{C_i,RMS}$ in kV | Std-Dev. in V | $U_{C_i,pp}$ mit Messunsicherheit in kV |
|---|----------------------|-------------------------|------------------------|------------------|--|
| Schub 1 | 0 | 17.152 | 2.409 | 0.7858 | 6.8137 ± 0.48 |
| Schub 2 | 0 | 17.241 | 2.411 | 2.0760 | 6.8193 ± 0.48 |
| Glätt 1 | 0 | 17.429 | 0.0223 | 20.2670 | 0.0631 ± 0.46 |
| Glätt 2 | 0 | 17.117 | - | 3.0559 | 13.449 ± 0.52 |

Table 5: Unbelastete Greinacherkaskade

5.4 Belastete Greinacherkaskade

| Kondensator C_i ($i = 1, 2, 3, 4$) | Last in $M\Omega$ | $U_{in,Lab,DC}$ in V | $U_{C_i,RMS}$ in kV | Std-Dev. in V | $U_{C_i,pp}$ mit Messunsicherheit in kV |
|---|----------------------|-------------------------|------------------------|------------------|--|
| Schub 1 | 100 | 14.750 | 2.068 | 325.5100 | 5.8492 ± 0.58 |
| Schub 2 | 100 | 17.203 | 2.391 | 2.7795 | 6.7628 ± 0.48 |
| Glätt 1 | 100 | 17.530 | 86.450 | 13.2580 | 244.5175 ± 4.26 |
| Glätt 2 | 100 | 17.203 | - | 9.6722 | 13.389 ± 0.52 |

Table 6: Belastete Greinacherkaskade

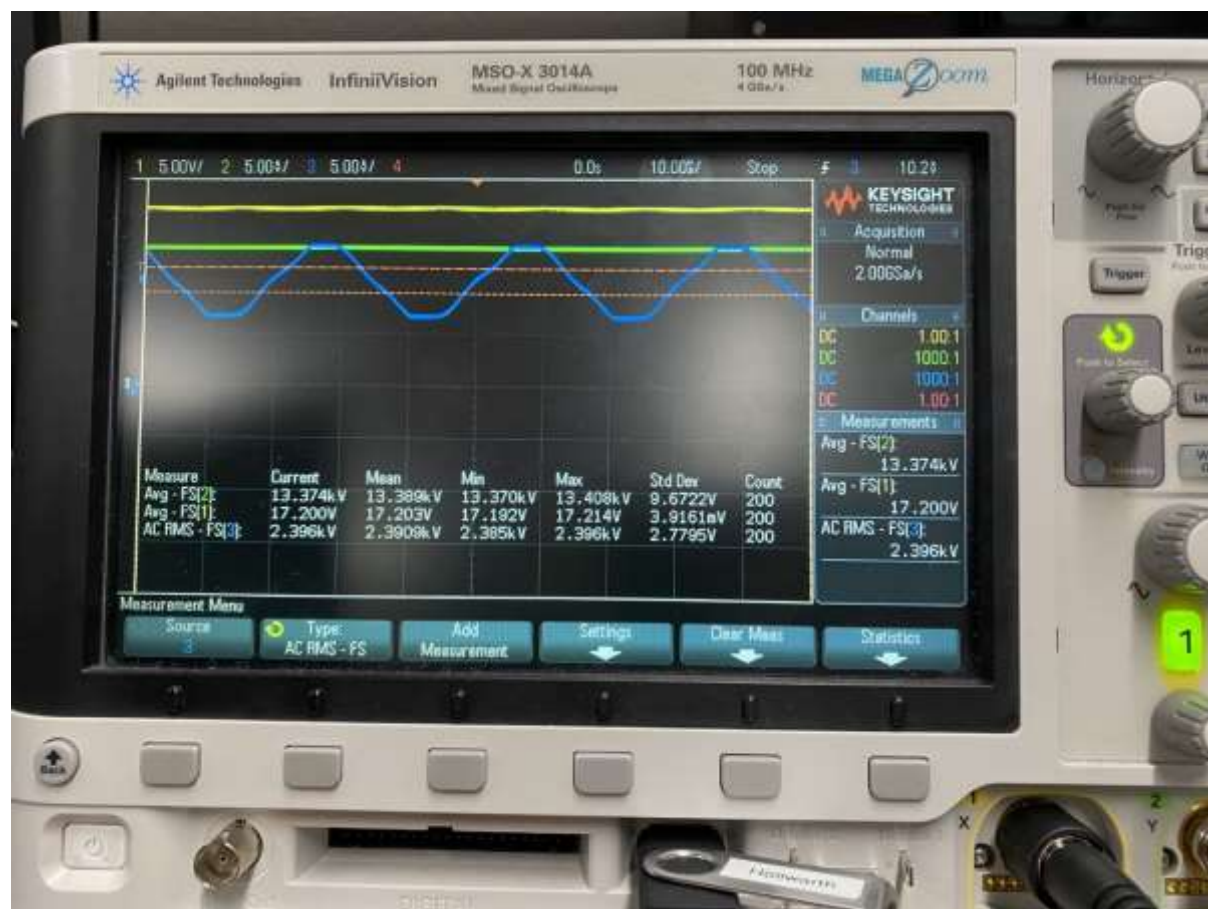


Abbildung 11: Beispiel der Schub 2 Messung am belasteten Oszilloskop.

5.5 Variiert belastete Greinacherkaskade

| Vorgabe | | Gemessen | | | | | | Berechnet | | Differenz | |
|----------------------|---------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
| Kapazitäten in nF | Last in MΩ | $U_{in,Lab,DC}$ in V | $U_{out,Trafo,RMS}$ in kV | $U_{out,GK,mean}$ in kV | $U_{out,max,GK}$ in kV | $U_{out,min,GK}$ in kV | Std.Dev. in V | $RippleI_{mean}$ in V | I_{in} in mA | $U_{out,GK,mean}$ in kV | $RippleI_{mean}$ in V |
| 1 | 10 | 17.638 | 2.523 | 13.282 | 13.5 | 13.064 | 8.073 | 155.13 | 1.328 | 14.175 | 218 |
| 1 | 50 | 17.538 | 2.512 | 13.427 | 13.455 | 13.402 | 9.349 | 71.155 | 0.269 | 14.366 | 26.5 |
| 1 | 100 | 17.111 | 2.466 | 13.449 | 13.456 | 13.441 | 29.358 | 60.11 | 0.134 | 14.049 | 7.5 |

Table 7: Messtabelle für die variiert belastete Greinacherkaskade mit Kondensatoren der Kapazität 1 nF*

| Vorgabe | | Gemessen | | | | | | Berechnet | | Differenz | |
|----------------------|---------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
| Kapazitäten in nF | Last in MΩ | $U_{in,Lab,DC}$ in V | $U_{out,Trafo,RMS}$ in kV | $U_{out,GK,mean}$ in kV | $U_{out,max,GK}$ in kV | $U_{out,min,GK}$ in kV | Std.Dev. in V | $RippleI_{mean}$ in V | I_{in} in mA | $U_{out,GK,mean}$ in kV | $RippleI_{mean}$ in V |
| 10 | 10 | 17.503 | 2.539 | 13.446 | 13.468 | 13.429 | 8.841 | 80.03 | 1.345 | 14.060 | 19.5 |
| 10 | 50 | 17.062 | 2.469 | 13.478 | 13.491 | 13.465 | 4.549 | 39.705 | 0.270 | 13.974 | 13 |
| 10 | 100 | 16.95 | 2.466 | 13.445 | 13.449 | 13.44 | 2.834 | 33.404 | 0.134 | 13.916 | 4.5 |

Table 8: Messtabelle für die variiert belastete Greinacherkaskade mit Kondensatoren der Kapazität 10 nF*

*Die Tabellen sind ohne die expliziten Messunsicherheiten verfasst.

6 Diskussion

6.1 Belastete und unbelastete Greinacherkaskade

Die Messreihen für die belastete, beziehungsweise unbelastete Greinacherkaskade, weisen beide gleiche Charakteristiken auf. Die Werte für Schub 1 und Glätt 2 sind grundsätzlich wie erwartet. Bei Schub 2 haben wir jedoch einen nur halb so grossen Wert, wie man eigentlich erwarten könnte. Wir sind nicht ganz schlüssig, warum diese Abweichung zu Stande kam. Eine mögliche Erklärung wäre, dass wir zwei Mal den Schub 1 gemessen haben. So müsste man sicher für eine zukünftige Messung grössere Sorgfalt walten lassen. Da wir ausserdem nur den RMS Wert gemessen haben, nicht aber die maximale Spannung, haben wir einen minimalen Wert erhalten bei Glätt 1. Man müsste die maximale Spannung messen, um so ein zufriedenstellenderes Ergebnis zu erhalten.

Weiter stellt man fest, dass die erwartete Spannung von $2n\hat{u}$ im belasteten Fall nicht erreicht wird. Es ist naheliegend, dass dies mit den nichtidealen Verhältnissen des Transformators und der Greinacherkaskade zusammenhängt. Weiter könnten der Innenwiderstand des Tastkopfes sowie des Oszilloskops eine Rolle spielen.

6.2 Rippel

Aus den Messwerten in 5.5 lässt sich entnehmen, dass der Rippel bei steigender Kapazität C_i ($i = 1, 2, 3, 4$) (also alle in der Greinacherkaskade enthaltenen und untereinander identischen Kondensatoren) als auch bei steigendem Ausgangswiderstand R_{out} abnimmt. Diese Beobachtung ist auch formell konsistent, da der Rippel umgekehrt proportional zur Kapazität und direkt proportional zum Ausgangsstrom ist. Letzterer ist wiederum reziprok proportional zum Ausgangswiderstand.

Es ist auch ersichtlich, dass die Messwerte deutlich höher sind als in der Theorie berechnet. Dies wurzelt in den Umständen der Messung selbst. Gemeint sind beispielsweise der Innenwiderstand des Tastkopfes, welcher durch das Abtasten einen Parallelwiderstand mit dem von uns gewählten Widerstand bildet. Dies kann insbesondere bei den Messungen mit sehr grossem Widerstand (ab $100\text{M}\Omega$) zu nennenswerten Abweichungen führen.

6.3 Spannungsabfall

Wie in der Formel unter 3.1.2 zu sehen ist, ist auch der Spannungsabfall umgekehrt proportional zum Ausgangswiderstand und den Kapazitäten. Dies ist wiederum in der Tabelle in 5.5 an den Messwerten wiederzuerkennen. Auffällig hierbei ist die Messung mit 1 nF & $50\text{ M}\Omega$, in welcher die Diskrepanz von berechnetem und gemessenem Wert am grössten ist.

Auch beim Spannungsabfall besteht die Gefahr von Messabweichungen aufgrund der Stromabhängigkeit, da der Innenwiderstand des Tastkopfes Auswirkungen auf den Ausgangswiderstand haben kann. Die Abweichungen der gemessenen Werte sind wieder durch den Mittelwert des Stromes durch den Ausgangswiderstand bedingt. Dieser ist höher als ideal berechnet, da der Ausgangswiderstand durch Parallelschalten mit dem Tastkopf sinkt.

Aus demselben Grund wird es auch nie möglich sein, bei der unbelasteten Greinacherkaskade den idealen Wert U_g zu messen, da durch den Messvorgang immer ein Strom durch den zusammengesetzten Ausgangswiderstand (Innenwiderstand Tastkopf) fliessen wird, welcher einen Spannungsabfall zur Folge hat. Dazu kommen weitere nichtideale Verhältnisse des Transformators und der Kondensatoren.

7 Eigenständigkeitserklärung

Das Messprotokoll haben wir während des Versuchstages gemeinsam erstellt, dabei haben wir abwechselnd vom Oszilloskop abgelesen und die Ergebnisse notiert.

Die Einführung, Auswertung, Berechnung der Messunsicherheiten und die Diskussion haben wir gemeinsam zu gleichen Teilen erstellt.

| Name | Legi-Nummer | Unterschrift |
|----------------------------|-------------|-------------------------------------|
| Andri Furrer | 19-930-296 | <i>Digitale Signatur via Moodle</i> |
| Thorbjörn Höllwarth | 17-923-905 | <i>Digitale Signatur via Moodle</i> |
| Sean Heller | 16-915-829 | <i>Digitale Signatur via Moodle</i> |