

Erzeugung HVDC (Greinacher)

Laborbericht / Versuchsprotokoll des Laborpraktikas Nr.3

Gallus Kaufmann, 16-921-223

Nando Galliard, 14-938-211

Serafin Herger, 14-932-040

227-0117-10L Mess- und Versuchstechnik

ETH Zürich

26.03.2020

Hinweis:

Dieser Bericht wurde zu gleichen Teilen verfasst von Nando Galliard, Serafin Herger und Gallus Kaufmann.

Contents

1 Einführung	3
1.1 Versuchsziel	3
1.2 Theorie	3
1.2.1 Greinacherkaskade	3
1.2.2 Rippelanalyse von Gleichrichterschaltungen	4
1.2.3 Formeln und Herleitung	4
1.3 Simulationsmodel einer zweistufigen Greinacherkaskade	4
1.3.1 Zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung im eingeschwungenen Zustand .	5
1.4 Versuchsaufbau	8
1.4.1 Versuchsaufbau des unbelasteten HVAC Trafos	8
1.4.2 Messplan des HVAC Trafos	8
1.4.3 Versuchsaufbau der Greinacherkaskade	9
1.4.4 Messplan der Greinacherkaskade	10
1.4.5 Messunsicherheiten der verfügbaren Versuchs- und Messmittel	10
1.5 Ergänzende Einführung	12
2 Messprotokoll	13
2.1 Verwendete Infrastruktur	13
2.1.1 Umgebungsbedingungen	13
2.1.2 Verwendete Geräte	13
2.2 Messaufbau des HVAC Trafos	13
2.3 Messergebnisse des HVAC Trafos	14
2.4 Messaufbau der Greinacherkaskade	14
2.5 Messergebnisse der Greinacherkaskade	15
2.5.1 Greinacherkaskade (1nF) unbelastet	15
2.5.2 Greinacherkaskade (1nF) belastet mit $100M\Omega$	16
2.5.3 Greinacherkaskade (1nF) belastet mit $50M\Omega$	16
2.5.4 Greinacherkaskade (1nF) belastet mit $10M\Omega$	17
2.5.5 Greinacherkaskade (10nF) unbelastet	17
2.5.6 Greinacherkaskade (10nF) belastet mit $100M\Omega$	17
2.5.7 Greinacherkaskade (10nF) belastet mit $50M\Omega$	17
2.5.8 Greinacherkaskade (10nF) belastet mit $10M\Omega$	18
3 Ergebnis	19
3.1 Zweistufige Greinacherkaskade mit 1nF Kondensatoren	19
3.2 Zweistufige Greinacherkaskade mit 10nF Kondensatoren	20
3.3 Spannungen über Schub- und Glättungssäulen	20
4 Messunsicherheiten	21
4.1 Resultat:	21
5 Diskussion	24
5.1 Ergebnise	24
5.2 Messunsicherheiten	24

6 Anhang	26
6.1 Oszilloskopbilder	26
6.1.1 HVAC Transformator	26
6.1.2 2-stufige Greinacherkaskade mit 1nF Kondensatoren	26
6.1.3 2-stufige Greinacherkaskade mit 10nF Kondensatoren	32
6.2 Diagramme und Schaltungen der Simulation	36

1 Einführung

1.1 Versuchsziel

Die Aufgabe dieses Versuch ist es, das Verständnis der Greinacherkaskade mittels Simulation und Experiment zu vertiefen. Mit Hilfe der Greinacherkaskade im lastfreien und belasteten Fall soll die Erzeugung hoher Gleichspannungen aus niedrigen Wechselspannungen untersucht werden.

1.2 Theorie

1.2.1 Greinacherkaskade

Die Verdopplerschaltung nach Greinacher besteht aus einer Verdopplerschaltung nach Villard (siehe Abb. 1 blau dargestellt) und einer Gleichrichterschaltung (orange dargestellt). Diese Verdopplerschaltung besteht aus einem Schubkondensator C_1 , einem Glättungskondensator C_2 und zwei Dioden D_1, D_2 . Die Verdopplerschaltung nach Villard führt zu einer Spannungsverdopplung im unbelasteten Fall der Eingangswchselspannung. Diese Wechselspannung wird danach in der Gleichrichterschaltung gleichgerichtet und man erhält am Ausgang eine Gleichspannung $U_{DC} = 2 \cdot \hat{U}_T$.

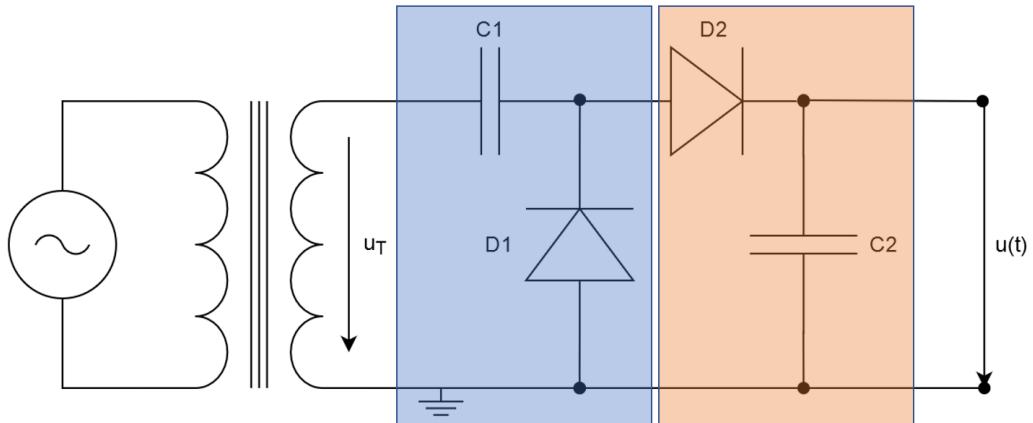


Figure 1: Ersatzschaltbild der Verdopplungsschaltung nach Greinacher. Blau: Verdopplerschaltung nach Villard. Orange: Gleichrichterschaltung.

Das Ersatzschaltbild der Verdopplerschaltung nach Greinach in Abb. 1 zeigt eine Stufe der Greinacherkaskade. Werden nun n dieser Verdopplerschaltungen seriell zusammengefügt, erhält man eine Greinacher-Kaskade mit n Stufen. Ein Ersatzschaltbild einer zweistufigen Greinacherkaskade ist in Abb. 2 gegeben. Weil sich mit jeder neuen Stufe die Ausgangsspannung verdoppelt, erhält man für eine unbelastete n -stufige Greinacherkaskade eine Ausgangsspannung (4) von: $U_{DC} = n \cdot 2 \cdot \hat{U}_T$. Für eine belastete Greinacherkaskade werden die Kondensatoren gleich gross gewählt und die Ausgangsspannung (5) ergibt sich aus der Differenz zwischen Leerlauf und dem belasteten Spannungsabfall.

1.2.2 Rippelanalyse von Gleichrichterschaltungen

Weil die Gleichrichterschaltung die Ausgangsspannung mittels Kondensatoren nicht optimal glätten kann, muss die Welligkeit - auch Rippel genannt - beachtet werden. Dieser Rippel δu lässt sich allgemein gemäss Formel (6) aus der maximalen und minimalen Spannung berechnen und für eine Greinacherkaskade gemäss Formel (7). Der Rippelfaktor ergibt sich aus einer Division des Ripples δu durch die DC-Ausgangsspannung U_{DC} (8).

1.2.3 Formeln und Herleitung

Elektrische Spannung:	$U = R \cdot I$	$[U] = V, [R] = \Omega, [I] = A$	(1)
Wechselspannung:	$u(t) = \hat{U}_{AC} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$	$[u(t)] = V$	(2)
Frequenz:	$f = 2\pi \cdot \omega$	$[f] = Hz, [\omega] = Hz$	(3)
Ausgangsspannung unb. Grein.:	$U_{DC} = n \cdot 2 \cdot \hat{U}_T$		(4)
Ausgangsspannung bel. Grein.:	$U_{DC} = 2n\hat{u} - \frac{\bar{i}}{fC} \cdot \frac{8n^3+9n^2+n}{12}$	$[C] = F$	(5)
Rippel allgemein:	$\delta u = 0.5 \cdot (u_{max} - u_{min})$		(6)
Rippel n-stufiger Grein.-Kask.:	$\delta u = \frac{\bar{i}}{f \cdot C} \cdot \frac{n \cdot (n+1)}{4}$		(7)
Welligkeitsfaktor:	$\delta u / U_{DC} = \frac{0.5 \cdot (u_{max} - u_{min})}{U_{DC}}$		(8)

Wobei: n die Anzahl Stufen, f die Frequenz des Eingangsignals, \hat{U} die Amplitude der Eingangsspannung, \bar{i} der mittlere Laststrom, unb.: unbelastet, bel.:belastet, Grein.: Greinacher, Kask.: Kaskade

1.3 Simulationsmodel einer zweistufigen Greinacherkaskade

Gegeben durch die momentane Situation simulieren wir die zweistufige Greinacherkaskade im Programm "LTspice".

Als Grundlage für die Simulation verwenden wir das Ersatzschaltbild aus Abbildung 2, welches aus folgenden idealen Bauteilen besteht:

- Eine sinusoidale AC-Spannungsquelle $u_2(t)$ mit einer maximalen Amplitude von 3.75 kV, einer Eigenfrequenz von 33 kHz und ohne DC Offset oder Zeitverzögerung.
- Eine vorgegebene maximale Ausgangsspannung von 15 kV.
- Zwei Schubkondensatoren C_1 und C_3 mit 1 nF.
- Zwei Glättungskondensatoren C_2 und C_4 mit 1 nF.
- Vier Dioden D_1, D_2, D_3 und D_4 mit jeweils einem durchschnittlichen Durchlassstrom von 0.2 A und einer Durchbruchspannung von 75 V.
- Einem Entladewiderstand R_1 von 1 GΩ für die Entladung der Kondensatoren.
- Einem Lastwiderstand R_2 von 100 MΩ

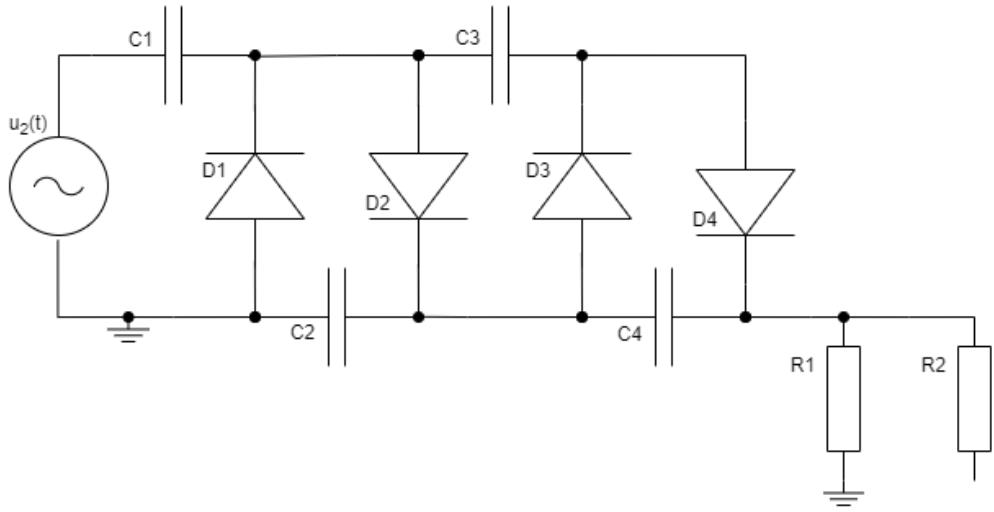


Figure 2: Ersatzschaltbild der zweistufigen Greinacherkaskade.

Gemäss der Gleichung 4 darf für eine maximale Ausgangsspannung $U = 15 \text{ kV}$ bei $n = 2$ Stufen die Eingangsspannung mit einer Amplitude von maximal 3.75 kV anliegen.

1.3.1 Zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung im eingeschwungenen Zustand

Wir simulieren den zeitlichen Verlauf der Ausgangsspannung und aller Zwischenabgriffe (auf Schub- und Glättungssäule) gegen Erde für eine Last $R_2 = 100 \text{ M}\Omega$, bei einer Ausgangsspannung U_{DC} von 13.5 kV und 33 kHz treibender Frequenz f . Um die Amplitude der Eingangsspannung $u_2(t)$ zu berechnen, formen wir Gleichung 5 um. Dabei ist $\bar{i} = U_{DC}/R_L$ und $R_L = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$. Somit ergibt sich:

$$\hat{u} = \frac{1}{2n} (U_{DC} + \frac{U_{DC}}{fCR_L} \cdot \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12}) \quad (9)$$

Dies ergibt eine Eingangsamplitude von 3.38 kV .

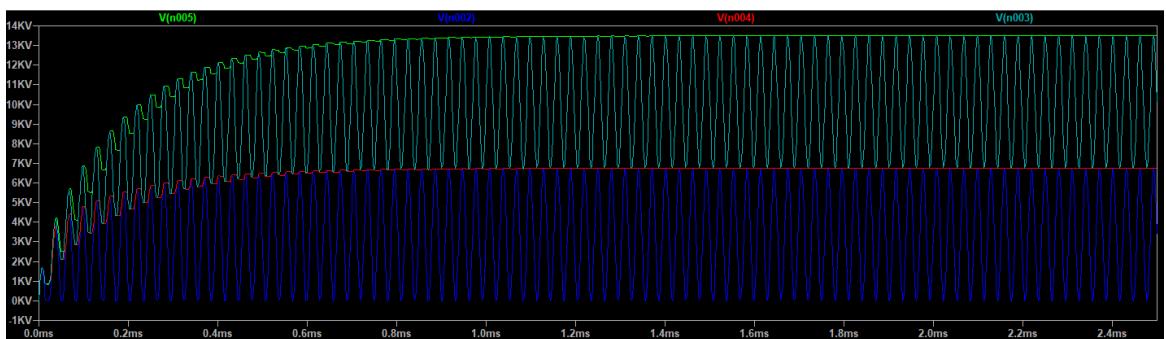


Figure 3: Simulierter Spannungsverlauf.

In Abbildung 4 stellen wir einen Sweep der Eingangs frequenzen von der Wechselspannung und deren Einfluss auf die Einschwingzeit dar. Je höher die Frequenz desto kleiner der Rippel, da die Kondensatoren weniger Zeit zum Entladen haben. Nach dem Zeitfenster von 2.5 ms sieht man, dass sich die Ausgangsspannung der Versuche mit Frequenz $f = 1\text{kHz}$ (Grün) bis $f = 10\text{kHz}$ (Rot) noch nicht einschwingen konnten. Bei hohen Frequenzen ist die Einschwingzeit um einiges kürzer und die erwünschte Ausgangsspannung von 13.5 kV wird zeitig erreicht.

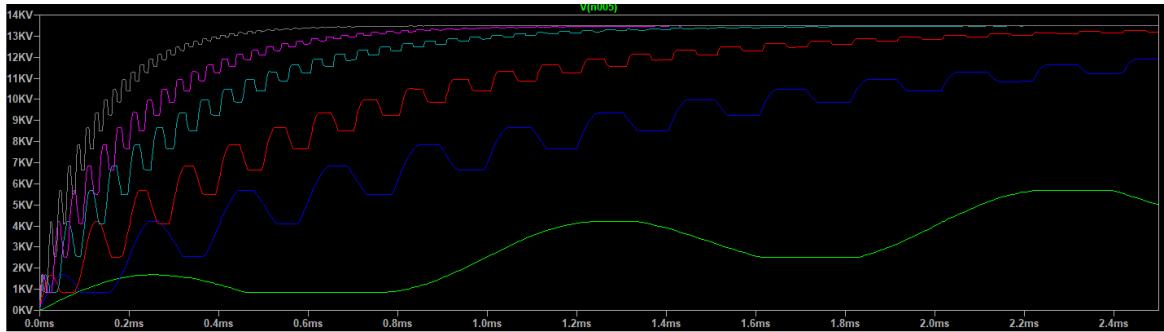


Figure 4: Variierte Eingangsfrequenz

In Abbildung 5 und 6 ist die Abhängigkeit des Spannungsabfalls Δu und des Rippels δu als Funktion der Eingangsfrequenz dargestellt mit einer Last von $10 \text{ M}\Omega$.

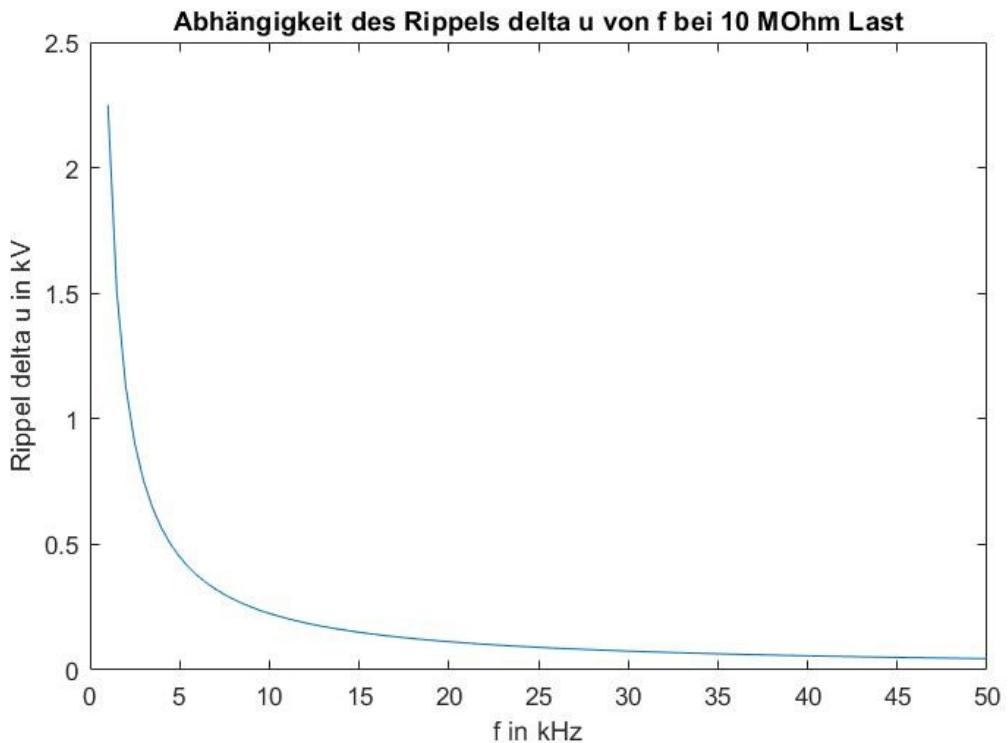


Figure 5: Rippel Δu gegen Frequenz f mit $10 \text{ M}\Omega$

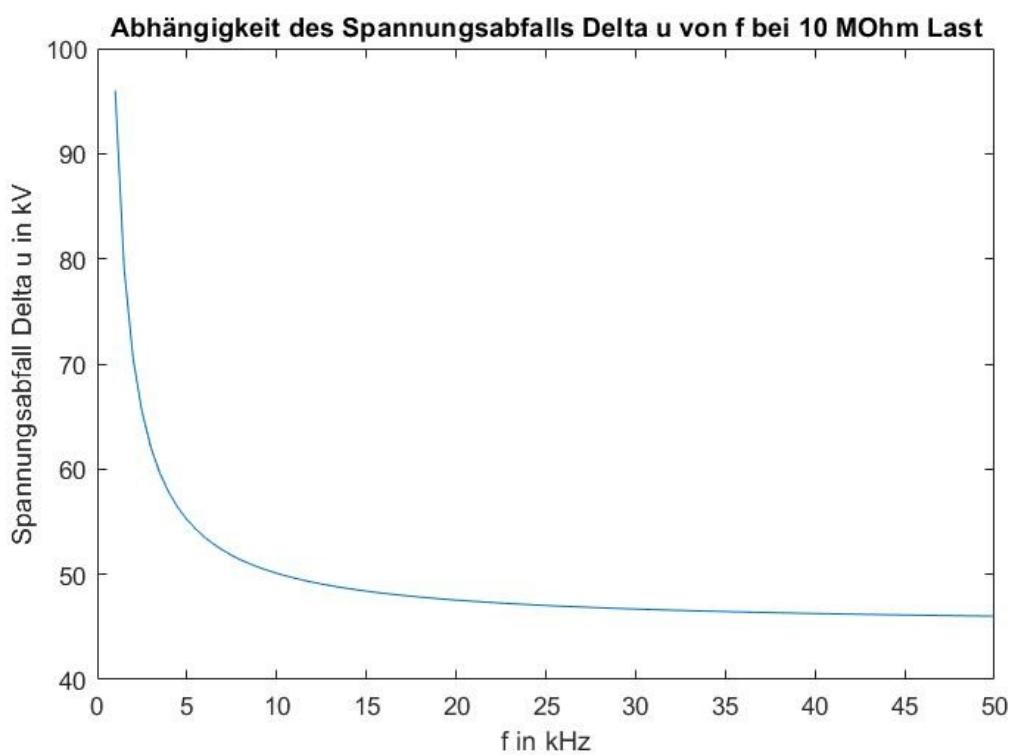


Figure 6: Spannungsabfall δu gegen Frequenz f mit $10 M\Omega$

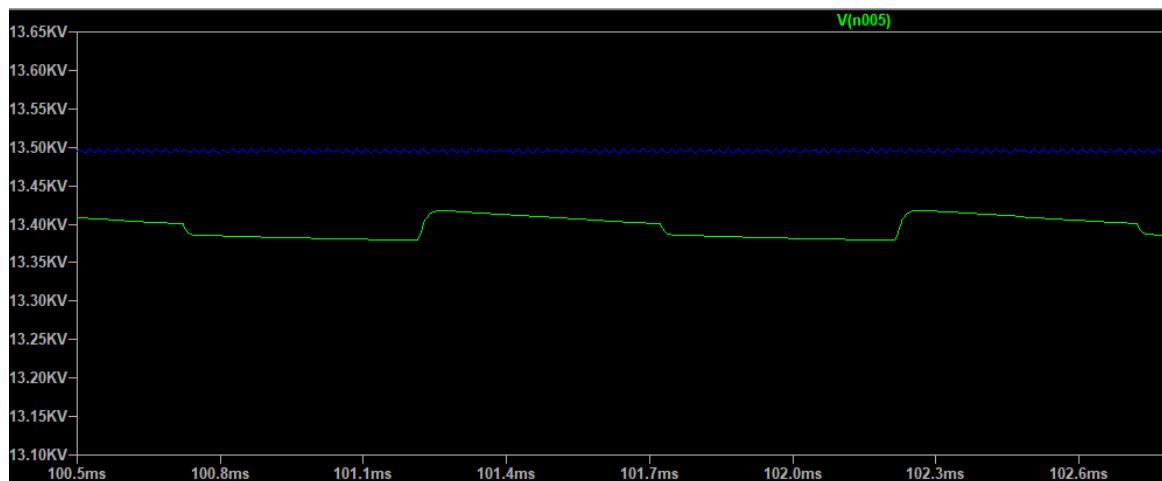


Figure 7: Unterschied der Frequenzabhängigkeit des Spannungsabfalls Δu des Rippels δu . Beide Kurven befinden sich im Eingeschwungen Zustand. Grün ist $f = 1kHz$, Blau $f = 50kHz$

1.4 Versuchsaufbau

1.4.1 Versuchsaufbau des unbelasteten HVAC Trafos

Die AC-Ausgangsspannung des HVAC Trafos wird mittels Oszilloskop gemessen. Dazu wird der HVAC Trafo an eine DC-Spannungsquelle angeschlossen. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt. Damit die maximale Isolationsfestigkeit von 15 kV der Tastköpfe nicht überschritten wird, muss zuerst die maximal erlaubte DC-Eingangsspannung berechnet werden.

Da die Ausgangsspannung maximal 15kV betragen darf und die Eingangsspannung zwei mal verdoppelt wird, darf die maximale Eingangsspannung maximal $\frac{15kV}{4} = 3.75kV$ betragen.

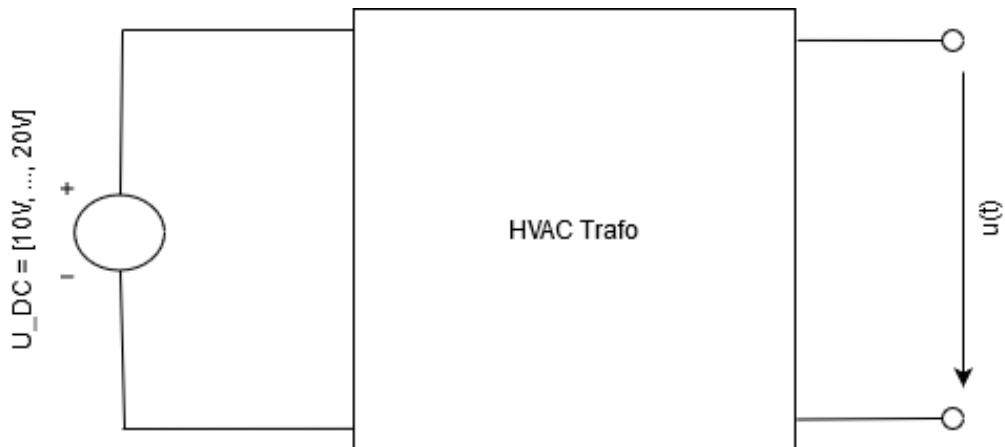


Figure 8: Messungsaufbau unbelasteter HVAC Trafo

1.4.2 Messplan des HVAC Trafos

$U_{DC,in}$ startet bei 10V und bei der zehnten Messung sollte $U_{DC,in}$ circa 20V betragen.

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in μ V	frequency in kHz	Übersetzungsverhältnis \ddot{u}_{idx} berechnet
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Table 1: Messplan unbelasteter HVAC Trafo

1.4.3 Versuchsaufbau der Greinacherkaskade

Für die Speisung der 2stufigen Greinacherkaskade verwenden wir den HVAC Trafo. Die in die Kaskade eingespiesene Frequenz ist circa 33 kHz. Weil diese allerdings aufgrund der Last variieren kann, sollte diese im Ausgang stets mitgemessen werden. Gemessen wird also die Einspeisung und die Ausgangsspannung (inkl. Frequenz) (vgl. Abbildung 9).

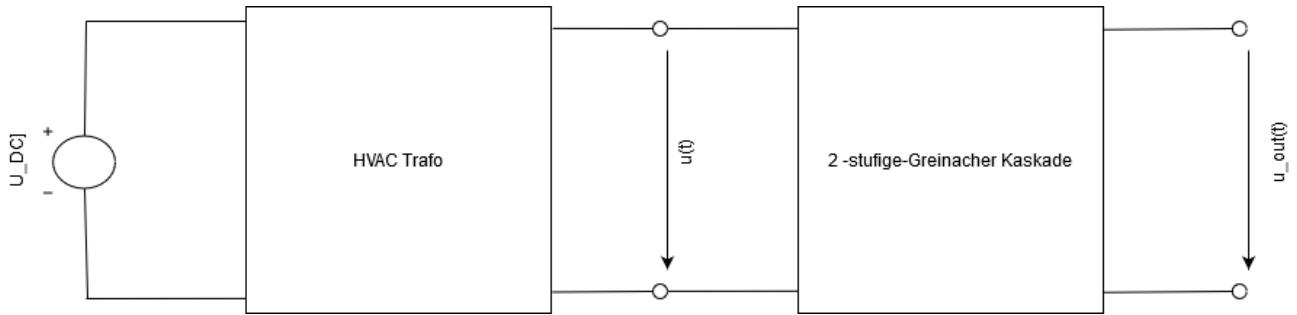


Figure 9: Messungsaufbau mit Greinacherkaskade

Der Spannungsabfall Δu ist die Differenz zwischen der idealen Ausgangsspannung und der gemessenen Ausgangsspannung. Gleichung (5) liefert uns das Resultat: $\Delta u = 2n\hat{u} - u_{measure} = U_{DC} = 2n\hat{u} - \frac{i}{fC} \cdot \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12}$. Daher wird in diesem Versuch sowohl die Eingangsspannung (zur bestimmung der Amplitude \hat{u} der Eingangsspannung) als auch die Ausgangsspannung $u_{measure}$ gemessen.

1.4.4 Messplan der Greinacherkaskade

Für jeweils folgende Einstellungen:

- unbelastet, 1nF
- unbelastet, 10nF
- $10M\Omega$, 1nF
- $50M\Omega$, 1nF
- $100M\Omega$, 1nF
- $10M\Omega$, 10nF
- $50M\Omega$, 10nF
- $100M\Omega$, 10nF

Werden folgende stationäre Werte vom Oszilloskop gemessen (davon jeweils den Mittelwert, Standartabweichung, Volt/div, Zählerwert, Maximum, Minimum):

- $U_{DC,in}$ in V
- $u_{AC,peak-to-peak}$ in V
- $u_{Schub1AC,peak-to-peak}$ in V
- $u_{Glätt1AC,peak-to-peak}$ in V
- $u_{Schub2AC,peak-to-peak}$ in V
- $u_{Glätt2AC,peak-to-peak}$ in V
- $u_{Glätt1Ripple,peak-to-peak}$ in V
- $u_{Glätt2Ripple,peak-to-peak}$ in V
- frequenz in Hz

1.4.5 Messunsicherheiten der verfügbaren Versuchs- und Messmittel

Die Fehlerfortpflanzung ist hier nicht notwendig. Daher wird nur die Unsicherheitsanalyse der Messgrößen betrachtet.

- Tastkopf (TESTTEC TT-HVP 15HF): Falls korrekt an den $1M\Omega$ Eingang des Oszilloskops angeschlossen, dann hat dieser ein Teilverhältnis von 1'000:1.
 - Typ B Messunsicherheit
 - Genauigkeit: $\pm 6\%$
 - Erweiterungsfaktor: $k = 2$

- Labornetzteil (GW Instek GPS-3303S):
 - Typ B Messunsicherheit
 - Genauigkeit: $0.02\% \pm 5mV$
- Ozilloskop (Agilent MSOX3014A (4-Kanal, 100 MHz, 2GSa/s)
 - Die Unsicherheit des Ozilloskop wurde in der Unsicherheit des Tastkopfes bereits berücksichtigt. Im Experiment wird zusätzlich durch Mittelung mehrerer Messungen mit der dazugehörigen Standartabweichung gerechnet.
 - * Aus der Mittelwertbildung mehrerer Messungen im static mode am Oszilloskop: $u_1 = U_{mean} \sigma_{relativ}$
 - * Quantisierungsfehler (8 Bit vertikale Auflösung): $u_2 = \frac{U_{max}/2^8}{2 \cdot \sqrt{3}}$
 - * Worst-case maximale Ungenauigkeit bei Spannungsmessungen mit dem Oszilloskop liegt bei 2% $u_3 = \frac{0.02 \cdot U_{Messbereich}}{\sqrt{3}}$

Dadurch kann eine kombinierte Standartunsicherheit des Oszilloskop berechnet werden.

$$u_{totStd} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (10)$$

- HVAC Trafo:

- Typ A Messunsicherheit
- Übertragungsverhältnis

$$\ddot{u} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}U_{in,DC}} \quad (11)$$

wobei \hat{u} die Spitzenspannung der AC-Aussgangsspannung ist.

- Da das \ddot{u} durch Mittelwertbildung aus den Messungen Nr. 1 bis 10 aus Tabelle 1 bildet, muss die Unsicherheit für das gemittelte Übersetzungsverhältnis einzeln berechnet werden.

$$\sigma = \frac{1}{10-1} \sum_{idx}^{10} (\ddot{u}_{idx} - \bar{u})^2 \quad (12)$$

Daraus resultiert für die Unsicherheit für \bar{u} :

$$\sigma_{\bar{u}} = \frac{\sigma}{\sqrt{10}} \quad (13)$$

Die Messunsicherheiten des Kabels, der Lastwiderstände und Kapazitäten werden vernachlässigt.

1.5 Ergänzende Einführung

Korrektur Gleichung in Kapitel 1.4.3 im Text unter Figure 9. Das Korrekte Resultat ist:

$$\Delta u = 2n\hat{u} - u_{measurement,HVDC} = \frac{u_{measurement,HVDC}}{RfC} \cdot \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12} \quad (14)$$

Ergänzung Formel (7) kann umgeformt werden mit $\bar{i} = U_{DC}/R_L$ und $R_L = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ zu:

$$\delta u = \frac{U_{DC}}{f \cdot C \cdot R_L} \cdot \frac{n \cdot (n + 1)}{4} \quad (15)$$

Damit hängt der Spannungsrippel offensichtlich von der HV Ausgangsgleichspannung U_{DC} der Kaskade und den Lastwiderstand R_L ab.

Ergänzung Zu Figur (4) sind spezielle Simulationsparameter notwendig welche hier noch ergänzend aufgelistet sind. Zu beachten in Figur (10) ist, dass eine Variable F erzeugt wird:

```
.step param F list 1k 5k 10k 20k 30k 50k
```

In der Simulation wird aus der Liste 1k bis 50k iteriert um die Frequenz der Spannungsquelle zu variieren mit:

```
SINE(0 3.38e3 {F} 0)
```

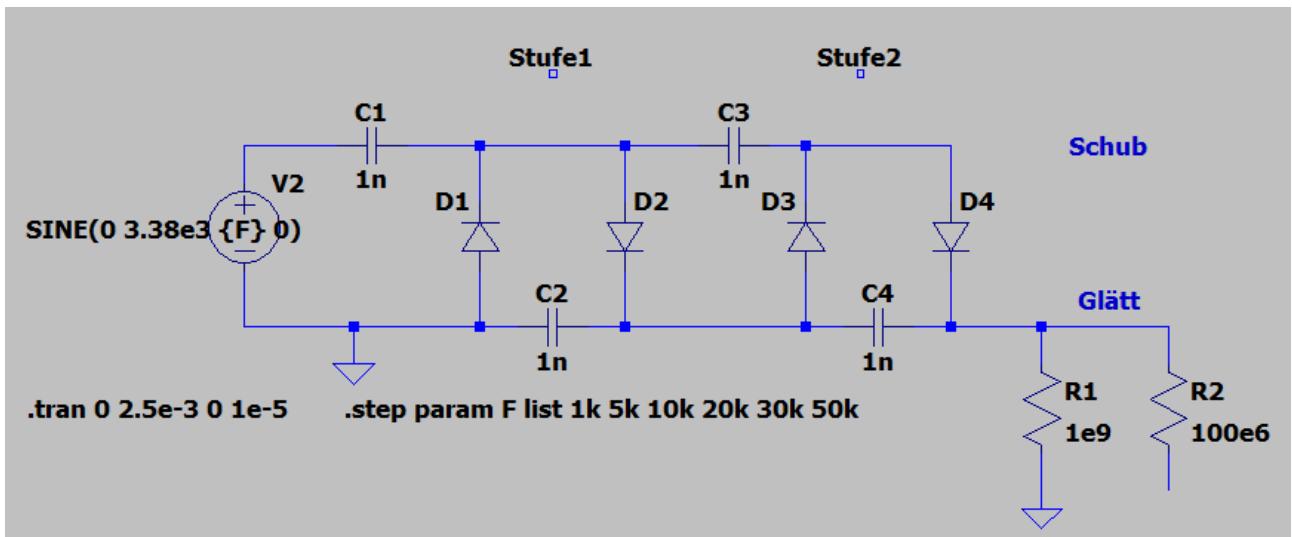


Figure 10: Iteration durch Frequenzen der Spannungsquelle.

2 Messprotokoll

2.1 Verwendete Infrastruktur

2.1.1 Umgebungsbedingungen

Ort: ETZ C99

Datum: 26.03.2020

2.1.2 Verwendete Geräte

Oszilloskop	Agilent Technologies MSOX-X 3014A (4-Kanal, 100MHz, 4GSa/s)
Sicherheitskreis	Impedanz von $1M\Omega$ bei allen Messungen
Tastkopf	Sicherheitskreis für Hochspannungszwecke
Koaxialkabel	TESTEC TT-HVP 15HF mit Teilverhältnis 1'000:1
DC-Spannungsquelle	RG58 mit BNC Steckern (Länge: ca. 1m)
HVAC Transformator	GW Instek GPS-3303S (Output Rating: 0 30V, 0 6A)
Greinacherkaskade	Zur Erzeugung hoher Ausgangswechselspannungen
	Zweistufig mit Kapazitäten 1nF und 10nF

2.2 Messaufbau des HVAC Trafos

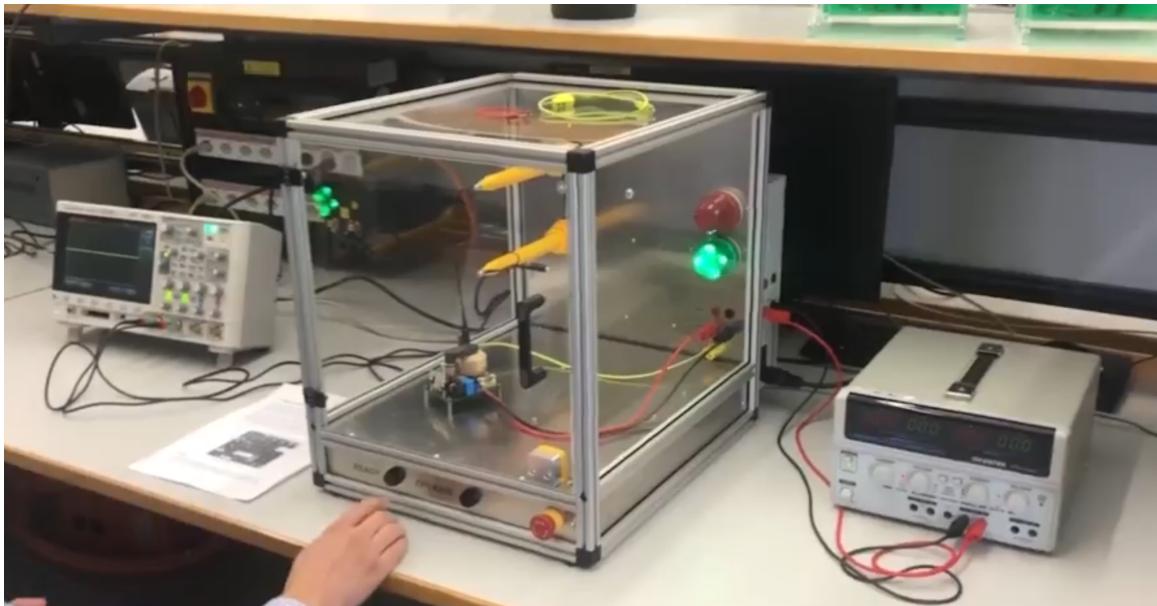


Figure 11: Aufbau der Messschaltung des HVAC Trafos

Das Ersatzschaltbild gemäss der Abb. 8 ist wie folgt in Abb. 11 in Realität umgesetzt. Die Messdaten sind im nächsten Abschnitt "2.3 Messergebnisse des HVAC Trafos" zu entnehmen.

2.3 Messergebnisse des HVAC Trafos

Zwei Messungen wurden durchgeführt. Die erste Messung ist sehr nah an der möglichen Belastung von 15kV am Ausgang, damit die Sonden nicht kaputt gehen. Für eine zweistufige Kaskade bedeutet dies, dass die Spitze-Spitze-Ausgangsspannung von 7.5kV nicht überschritten werden soll. In der Anleitung zu diesem Laborpraktikum unter 3a soll die Ausgangsspannung von 13.5kV nicht überschritten werden, deshalb hat die zweite Messung eine tiefere maximale Spitze-Spitze-Ausgangsspannung von 6.75kV. Die Frequenz wurde im Video nicht gemessen, man kann sie aber aus den Oszilloskop-Bildern bis zu einer gewissen Genauigkeit von ca. $\pm 2\text{kHz}$ bestimmen. Die berechnete Frequenz bleibt in allen Versuchsreihen gleich. Aus diesem Grund wird sie in dieser Messreihe nur in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in μV	Frequenz in kHz	Übersetzungsverhältnis \ddot{u}_{idx} berechnet	Zählwert
1	17.9	7.52	64.7	ca. 33.3	420.1	1000
2	15.8	6.59	372.4	ca. 33.3	417.1	1000

Table 2: Messplan unbelasteter HVAC Trafo

2.4 Messaufbau der Greinacherkaskade

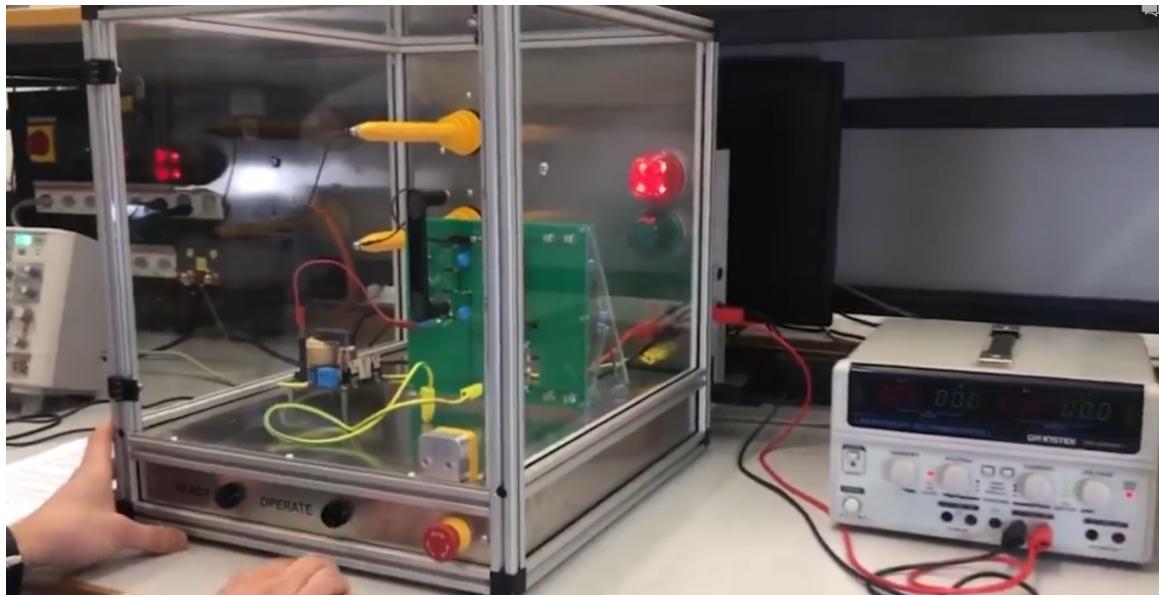


Figure 12: Aufbau der Messschaltung der Greinacherkaskade

Das Ersatzschaltbild gemäss der Abb. 9 ist wie folgt in Abb. 12 in Realität umgesetzt. Die Messdaten sind im nächsten Abschnitt "2.5 Messergebnisse der Greinacherkaskade" zu entnehmen.

2.5 Messergebinsse der Greinacherkaskade

2.5.1 Greinacherkaskade (1nF) unbelastet

Wie in der Anleitung gefordert wird zuerst die Greinacherkaskade unbelastet mit den kleinen Kapazitäten von 1nF eingesetzt. Im Folgenden werden die Spannungen am Ausgang sowie an allen Zwischenabgriffen in Schub- und Glättungssäule der Kaskade in Tabellen dargestellt.

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in μ V	$U_{Glätt2,DC,RMS}$ in kV	Stdv in V	Rippel δu in V	Zählwert
1	15.8	6.59	372.4	13.0	30.67	47	1000

Table 3: Messung der Glättungssäule 2 der unbelasteten Greinacherkaskade. (Kopplung: DC)

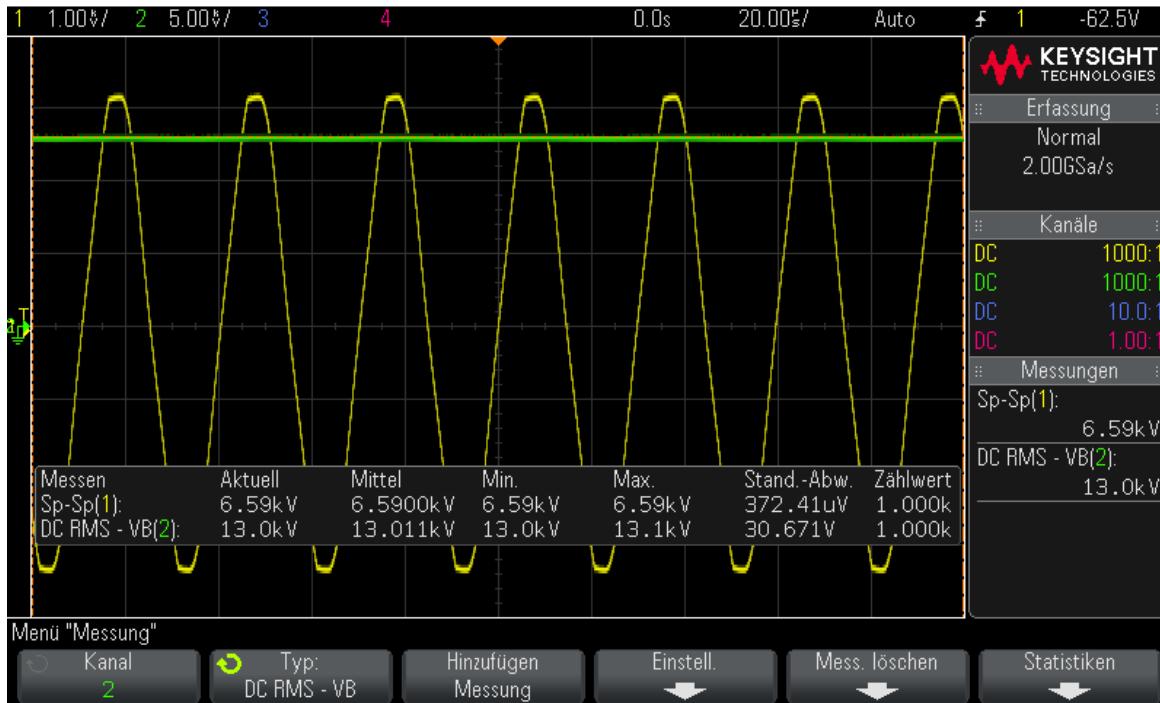


Figure 13: Screenshot des Oszilloskops der Messung der Glättungssäule 2 (unbelastete Kaskade)

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{Glätt1,DC,RMS}$ in kV	Stdv in V	Zählwert
1	15.8	6.62	18.4	6.45	2.02	331

Table 4: Messung der Glättungssäule 1 der unbelasteten Greinacherkaskade. (Kopplung: DC)

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{Schub1,pp}$ in kV	Stdv in V	Zählwert
1	15.8	6.75	3.44	6.59	5.93	803

Table 5: Messung der Schubsäule 1 der unbelasteten Greinacherkaskade. (Kopplung: DC)

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{Schub2,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{Schub2,DC,RMS}$ in kV	Stdv in V	Zählwert
1	15.8	6.71	7.11	6.61	19.40	10.17	4.79	338

Table 6: Messung der Schubsäule 2 der unbelasteten Greinacherkaskade. (Kopplung: DC)

2.5.2 Greinacherkaskade (1nF) belastet mit 100MΩ

Nun wird wie in der Anleitung gefordert die Greinacherkaskade mit einem Widerstand an der Ausgangsseite belastet. Nebst der Spitzen-Spitzen-Ausgangsspannung des HVAC Trafos $U_{HVAC,out,pp}$ wird der Mittelwert der Ausgangsspannung $U_{DC,out,Mw}$ gemessen (mit DC-Kopplung) und dessen Rippel δu (mit AC-Kopplung).

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{DC,out,Mw}$ in kV	Stdv in V	Rippel δu in V	Stdv in mV	Zählwert
1	15.8	6.51	20.1	12.86	4.11	54.89	210.6	659

Table 7: Messplan der Greinacherkaskade mit 1nF Kapazitäten belastet mit 100MΩ.

2.5.3 Greinacherkaskade (1nF) belastet mit 50MΩ

Gleiches Vorgehen wie in Abschnitt 2.5.2.

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{DC,out,Mw}$ in kV	Stdv in V	Rippel δu in V	Stdv in mV	Zählwert
1	15.8	6.51	0.0	12.77	4.4	63.83	164.2	456

Table 8: Messplan der Greinacherkaskade mit 1nF Kapazitäten belastet mit 50MΩ.

2.5.4 Greinacherkaskade (1nF) belastet mit 10MΩ

Gleches Vorgehen wie in Abschnitt 2.5.2.

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{DC,out,Mw}$ in kV	Stdv in V	Rippel δu in V	Stdv in mV	Zählwert
1	15.8	6.47	6.56	12.45	3.96	133.99	118.47	435

Table 9: Messplan der Greinacherkaskade mit 1nF Kapazitäten belastet mit 10MΩ.

2.5.5 Greinacherkaskade (10nF) unbelastet

Gleches Vorgehen wie in Abschnitt 2.5.2.

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{DC,out,Mw}$ in kV	Stdv in V	Rippel δu in V	Stdv in mV	Zählwert
1	15.8	6.59	14.11	13.01	5.38	26.98	151.88	255

Table 10: Messplan der Greinacherkaskade mit 10nF Kapazitäten unbelastet.

2.5.6 Greinacherkaskade (10nF) belastet mit 100MΩ

Gleches Vorgehen wie in Abschnitt 2.5.2.

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{DC,out,Mw}$ in kV	Stdv in V	Rippel δu in V	Stdv in mV	Zählwert
1	15.8	6.58	16.71	12.94	3.45	31.21	115.79	199

Table 11: Messplan der Greinacherkaskade mit 10nF Kapazitäten belastet mit 100MΩ.

2.5.7 Greinacherkaskade (10nF) belastet mit 50MΩ

Gleches Vorgehen wie in Abschnitt 2.5.2.

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{DC,out,Mw}$ in kV	Stdv in V	Rippel δu in V	Stdv in mV	Zählwert
1	15.8	6.51	4.13	12.88	3.73	35.89	125.70	372

Table 12: Messplan der Greinacherkaskade mit 10nF Kapazitäten belastet mit 50MΩ.

2.5.8 Greinacherkaskade (10nF) belastet mit 10MΩ

Gleiches Vorgehen wie in Abschnitt 2.5.2.

Messung Nr. idx	$U_{DC,in}$ in V	$U_{HVAC,out,pp}$ in kV	Stdv in V	$U_{DC,out,Mw}$ in kV	Stdv in V	Rippel δu in V	Stdv in mV	Zählwert
1	15.8	6.43	13.171	12.53	1.93	67.73	199.12	144

Table 13: Messplan der Greinacherkaskade mit 10nF Kapazitäten belastet mit 10MΩ.

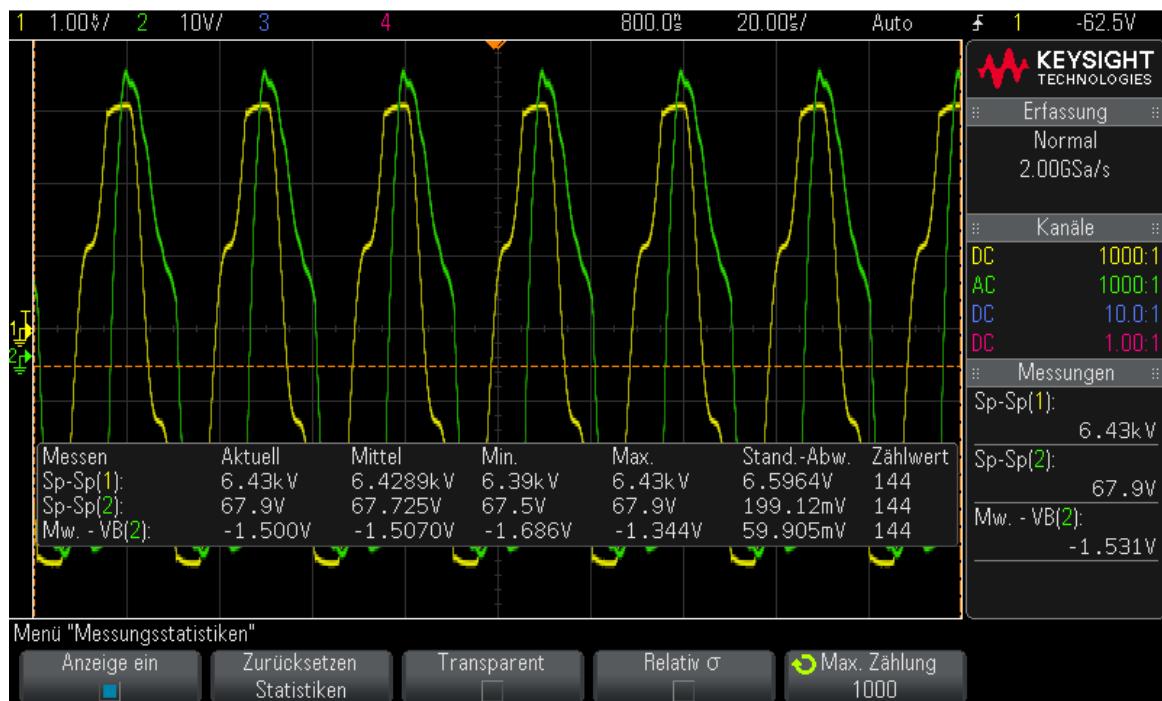


Figure 14: Screenshot des Oszilloskops der Messung der Greinacherkaskade mit 10nF Kapazitäten belastet mit 10MΩ Widerstand.

3 Ergebnis

In diesem Laborversuch haben wir einen HVAC Transformator in Serie mit einer zweistufigen Greinacherkaskade gesetzt, welche mit $C = 1 \text{ nF}$ oder $C = 10 \text{ nF}$ bestückt war. Der Messaufbau mit $C = 1 \text{ nF}$ ist in Abbildung (12) ersichtlich.

3.1 Zweistufige Greinacherkaskade mit 1nF Kondensatoren

Aus den Formeln (14) und (15) können wir den theoretischen Rippel und den Spannungsabfall bei 33 kHz berechnen. Die Messwerte der Simulation sind ablesbar mit der Zoom Funktion und dem Cursor Tool. Der reelle Rippel wurde mit dem Oszilloskop gemessen und der Spannungsabfall kann mit Formel (14) berechnet werden aus den Eingangs- und durchschnittlichen Ausgangsspannungen. Alle Diagramme und Schaltungen der Simulation sind im Anhang nachgeführt von Abbildung 35 bis und mit 42. Die Resultate sind in Tabelle 14 und 15 aufgelistet für die 1nF resp. 10nF Kaskade.

1 nF	Theoretisch		Simulation		Messung	
R	δu	Δu	δu	Δu	δu	Δu
1000 (unbelastet)	0.615	3.48	3	25	47^1	180
10	62.069	348.24	58.3	338.7	133.99 ± 0.12	490
50	12.906	69.65	12.5	87.3	63.83 ± 0.17	250
100	6.76	34.82	7.3	55.7	54.89 ± 0.22	160

Table 14: Theoretischer, simulierter und gemessener Rippel und Spannungsabfall für 1nF Kaskade

R	Lastwiderstand	$[R]$	$= M\Omega$
δu	Rippel	$[\delta u]$	$= V$
Δu	Spannungsabfall	$[\Delta u]$	$= V$

Eine erste Beobachtung ist, dass sich der Rippel in fast lineare Weise mit dem Widerstand verändert. Fast Linear, da im Nenner der Formel (15) des Rippels die Parallelschaltung der beiden Widerstände R_1 und R_2 steht und nicht nur der Widerstand R_2 .

¹Diese Messung wurde zwar mit dem Oszilloskop (AC-Kopplung) durchgeführt, allerdings wurden die Standardabweichungen weder gemessen noch gezeigt noch gespeichert.

3.2 Zweistufige Greinacherkaskade mit 10nF Kondensatoren

10 nF	Theoretisch		Simulation		Messung	
R	δu	Δu	δu	Δu	δu	Δu
1000 (unbelastet)	0.062	0.35	0.3	2.5	26.98 ± 0.16	170
10	6.207	34.82	6.1	37.1	67.73 ± 0.20	330
50	1.291	6.77	1.3	11.3	35.89 ± 0.13	140
100	0.676	3.48	0.7	8.2	31.21 ± 0.12	220

Table 15: Theoretischer, simulierter und gemessener Rippel und Spannungsabfall für 10nF Kaskade

$$\begin{array}{lll}
 R & \text{Lastwiderstand} & [R] = M\Omega \\
 \delta u & \text{Rippel} & [\delta u] = V \\
 \Delta u & \text{Spannungsabfall} & [\Delta u] = V
 \end{array}$$

In einer zweiten Beobachtung skalieren unsere Werte im Vergleich zu Tabelle 14 theoretisch komplett linear mit der Kondensatorgrösse in Formel (15), was in den Messungen nicht mehr komplett zu erkennen ist, wegen der Messgenauigkeit, welche wir im nächsten Kapitel noch genauer anschauen.

3.3 Spannungen über Schub- und Glättungssäulen

In der folgenden Tabelle werden die reell gemessenen und simulierten Spannungen über den Schub- und Glättungssäulen dargestellt.

Messung	reelle Spannung	simulierte Spannung
Schub 1 (C_1)	0 bis 6.59 kV_{pp}	0 bis 6.75 kV_{pp}
Schub 2 (C_3)	6.59 bis 13.2 kV_{pp}	6.75 bis 13.49 kV_{pp}
Glättung 1 (C_2)	6.45 kV_{pp}	6.75 kV_{pp}
Glättung 2 (C_4) bzw Ausgang	13.0 kV_{pp}	13.49 kV_{pp}

Table 16: Vergleich Messung und Simulation des unbelasteten Falles.

4 Messunsicherheiten

Die Unsicherheiten der Messgeräte ist in Kapitel 1.4.5 aufgelistet.

Es ist schnell ersichtlich, dass die $\pm 6\%$ Messgenauigkeit des Tastkopfes zusammen mit dem Oszilloskop jener Fehler ist, der am meisten überwiegt. Bei einer maximalen Ausgangsspannung von 15 kV an der Greinacher Kaskade, liegt somit eine maximale Unsicherheit von $\pm 900V$ vor. In der unten stehenden Tabelle 17 wurden die Fehler mit eben diesen 6% berechnet.

D Diese 6% Unsicherheit bei Spannungsmessungen betrifft ebenfalls die Schub- 1 2 und Glättungsspannungen 1 2. Diese Unsicherheiten sind in Tabelle 18 zu finden.

Messunsicherheiten resultierend aus der Mittelung des Übersetzungsverhältnis: Die Unsicherheit des gemittelten Übersetzungsverhältnisses kann mittels Gleichungen 12 und 13 berechnet werden. Schliesslich erhält man: $\bar{u} = 418.6 \pm 3$.

Gemäss Hinweis 2 der Versuchsanleitung soll in diesem Versuch keine Unsicherheitsanalyse der aus den Messgrössen ermittelten Grössen erfolgen. Insbesondere ist keine Fehlerfortpflanzung des Spannungsabfalls Δu und der Welligkeit δu notwendig. Aus dem Messprotokoll ist ersichtlich, dass diese beiden Werte jeweils über mehrere Werte gemittelt wurden. Die für δu gemessenen Werte liegen somit mit einer Wahrscheinlichkeit von 68.26 % innerhalb der durch die Standardabweichung und Mittelwert eindeutig definiertem Intervall. Um Redundanz zu vermeiden, wird hier auf eine erneute Auflistung dieser Werte verzichtet. Sämtliche gemittelten Werte mit Standardabweichung sind im Messprotokoll oder im Kapitel Ergebnis zu finden.

Weitere Unsicherheiten wie beispielsweise die Temperaturabhängigkeit der Widerstände und die mögliche Störung der beiden Tastköpfe (im Falle mangelndem Abstand) sind vernachlässigbar klein.

4.1 Resultat:

Schlussendlich kommt man zu folgender Messunsicherheit:

Für das Übersetzungsverhältnis gilt: $\bar{u} = 418.6 \pm 3$. Die weiteren Unsicherheiten sind der untenstehenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle	Messgrösse	Messwert mit Unsicherheit
2	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$ $17.9V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$7.52kV \pm 0.46kV$ $6.59kV \pm 0.40kV$
3	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.59kV \pm 0.40kV$
	$U_{Glätt2,DC,RMS}$	$13.0kV \pm 0.8kV$
4	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.62kV \pm 0.41kV$
	$U_{Glätt1,DC,RMS}$	$6.45kV \pm 0.39kV$
5	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.75kV \pm 0.41kV$
	$U_{Schub1,pp}$	$6.59kV \pm 0.40kV$
6	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.71kV \pm 0.41kV$
	$U_{Schub2,pp}$	$6.61kV \pm 0.40kV$
	$U_{Schub2,DC,RMS}$	$10.1kV \pm 0.7kV$
7	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.51kV \pm 0.40kV$
	$U_{DC,out,Mw}$	$12.8kV \pm 0.8kV$
8	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.51kV \pm 0.40kV$
	$U_{DC,out,Mw}$	$12.7kV \pm 0.8kV$
9	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.56kV \pm 0.40kV$
	$U_{DC,out,Mw}$	$12.4kV \pm 0.8kV$
10	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.59kV \pm 0.40kV$
	$U_{DC,out,Mw}$	$13.0kV \pm 0.8kV$
11	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.58kV \pm 0.40kV$
	$U_{DC,out,Mw}$	$12.9kV \pm 0.8kV$
9	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.51kV \pm 0.40kV$
	$U_{DC,out,Mw}$	$12.9kV \pm 0.8kV$
13	$U_{DC,in}$	$15.8V \pm 0.4V$
	$U_{HVAC,out,pp}$	$6.43kV \pm 0.40kV$
	$U_{DC,out,Mw}$	$12.5kV \pm 0.8kV$

Table 17: Messunsicherheiten Werte

Messung	reelle Spannung
Schub 1 (C_1)	$0kV_{pp} \pm 0kV$ bis $6.59kV_{pp} \pm 0.40kV$
Schub 2 (C_3)	$6.59kV_{pp} \pm 0.40$ bis $13.2kV_{pp} \pm 0.8$
Glättung 1 (C_2)	$6.45kV_{pp} \pm 0.39$
Glättung 2 (C_4) bzw Ausgang	$13.0kV_{pp} \pm 0.8$

Table 18: Vergleich Messung und Simulation des unbelasteten Falles.

5 Diskussion

5.1 Ergebnise

Betrachtet man die Tabellen 14 und 15 aus dem Kapitel Ergebnis lässt sich Folgendes entnehmen. Mit der Greinacherschaltung, welche mit kleineren Kapazitäten von 1nF bestückt ist, wurde einen grösseren Rippel δu und einen grösseren Spannungsabfall Δu gemessen als mit der Greinacherschaltung, welche mit 10nF Kapazitäten bestückt ist. Der Grund dafür liefern die beiden Formeln (5) und (7) aus Kapitel 1.2.3 aus der Theorie der Greinacherkaskade. Beide Formeln zeigen, dass der Rippel δu sowie der Spannungsabfall Δu umgekehrt proportional zu den verwendeten Kapazitäten sind. Dementsprechend ist der Rippel δu und der Spannungsabfall Δu grösser bei kleineren Kapazitäten.

Bei den Spannungsmessungen muss erwähnt werden, dass sich in der Realität durch die Verkabelung, Tastköpfe und das Oszilloskop noch weitere Innenwiderstände R_i einschleichen. Dies führt zu starken Abweichungen zwischen Messung und Simulation.

Aus der Tabelle 16 ist ersichtlich, dass die gemessenen Spannungen über die Schub- als auch über die Glättungssäule ungefähr den simulierten Spannungen entsprechen unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten aus Tabelle 18.

Durch den Vergleich der Simulationswerte, den theoretisch berechneten Werten mit den Werten der Messergebnisse ist weiteres ersichtlich. Der gemessene Rippel δu als auch der Spannungsabfall Δu ist über sämtliche Widerstände höher als die theoretisch berechneten oder simulierten Werte. Dies lässt sich durch Nichtidealitäten der realen Bauteile, Tastköpfen und dem Oszilloskop erklären, welche wie oben erwähnt nicht in der Simulation enthalten sind.

Weiterhin haben wir in der Simulation am Ausgang des HVAC Transformatoren stets konstante 6.76 kV. Wie die Messungen im Versuch zeigen, ist dieser Wert in der Realität nicht konstant. Dies könnte man ebenfalls wieder auf die Nichtidealitäten der realen Bauteile zurückführen, wie z.B. die Temperaturabhängigkeit der Widerstände.

5.2 Messunsicherheiten

In der Messunsicherheitsanalyse in Kapitel 4 wurden nur die Fehler der mit dem Tastkopf und dem Oszilloskop gemessenen Spannungen und der statistische Fehler durch Mittelung bei dem Übersetzungsverhältnises berechnet. Es wurde folglich keine Fehlerfortpflanzung berechnet und weitere Fehlerquellen ignoriert. Das kann dadurch begründet werden, dass das Rauschen und die Oszilloskop Messunsicherheiten in Relation zu den sehr hohen gemessenen Spannungen vernachlässigbar klein sind.

Die Messunsicherheit des Rippels ergibt sich somit aus dem Mittel mehrerer Werte und der damit einhergehenden Standardabweichung. Leider wurde am Versuchstag vergessen die Daten für den Rippel an der unbelasteten Greinacherkaskade mit der Kapazität von 1nF zu exportieren. Der Wert 47V für den Rippel im soeben beschrieben Fall, wurde durch pausieren

der Video Aufzeichnung (siehe Abbildung 15) ausgelesen (mit AC-Kopplung). Leider war es uns im Nachhinein nicht möglich, eine Standardabweichung auszulesen, daher können wir über die Messunsicherheit dieses einzelnen Wertes nichts aussagen. Weil alle anderen gemessenen Rippel eine in Relation zum gemessenen Mittelwert kleine Standardabweichung haben, lässt sich aber vermuten, dass auch dieser Wert vernünftig sein wird.

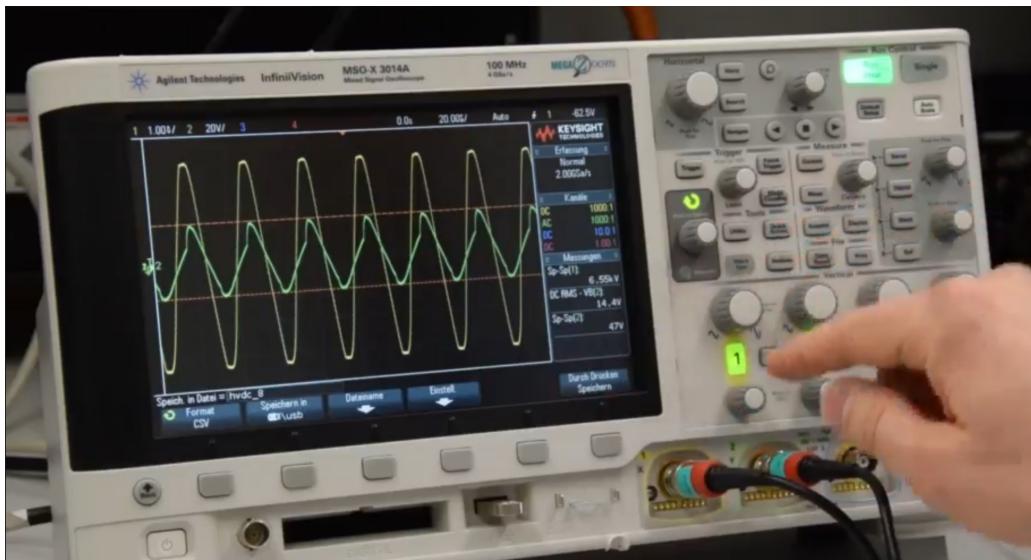


Figure 15: Bildschirmaufnahme des Labor Videos um den Rippel bei der unbelasteten 1nF Greinacherkaskade auszulesen

6 Anhang

6.1 Oszilloskopbilder

6.1.1 HVAC Transformator

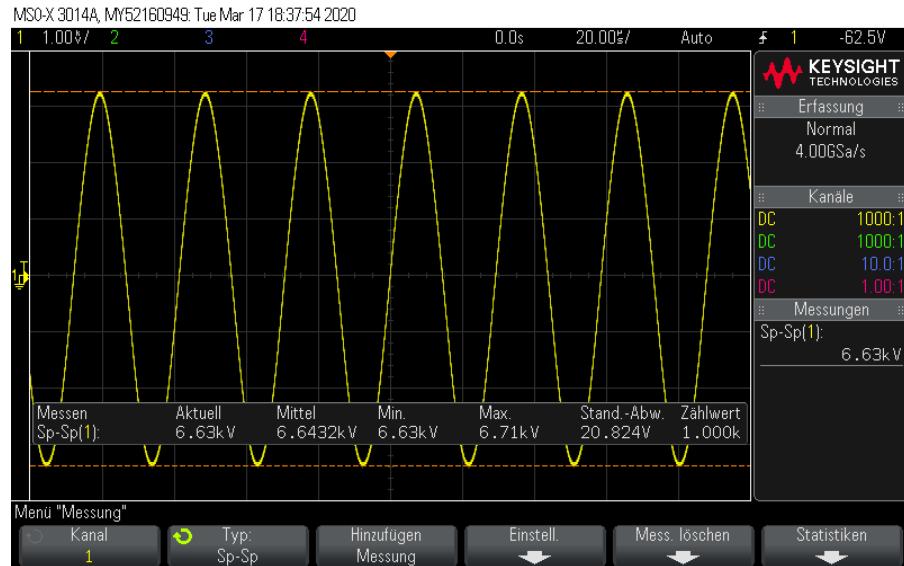


Figure 16: AC Ausgangsspannung des HVAC Transformators

6.1.2 2-stufige Greinacherkaskade mit 1nF Kondensatoren

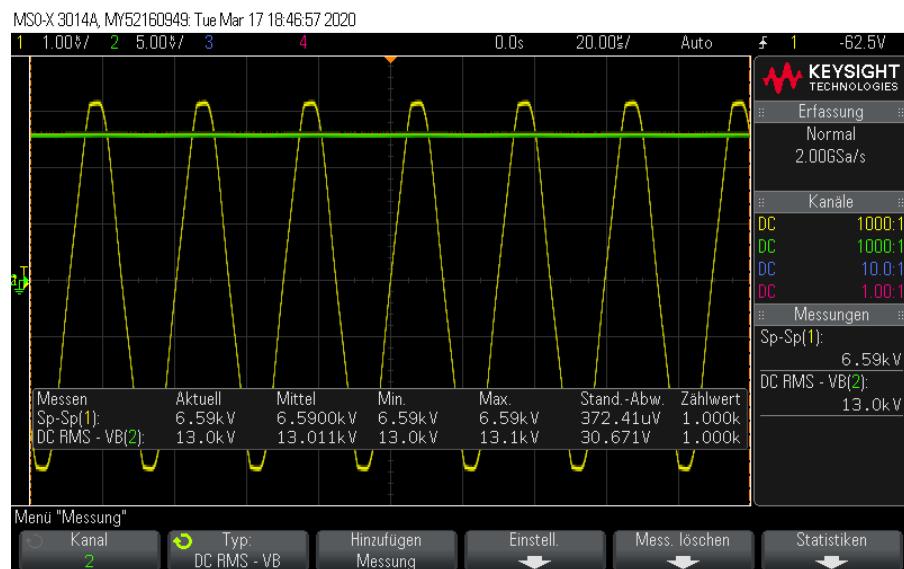


Figure 17: Verlauf von Eingangs- und Ausgangsspannung der unbelasteten Greinacher Kaskade.

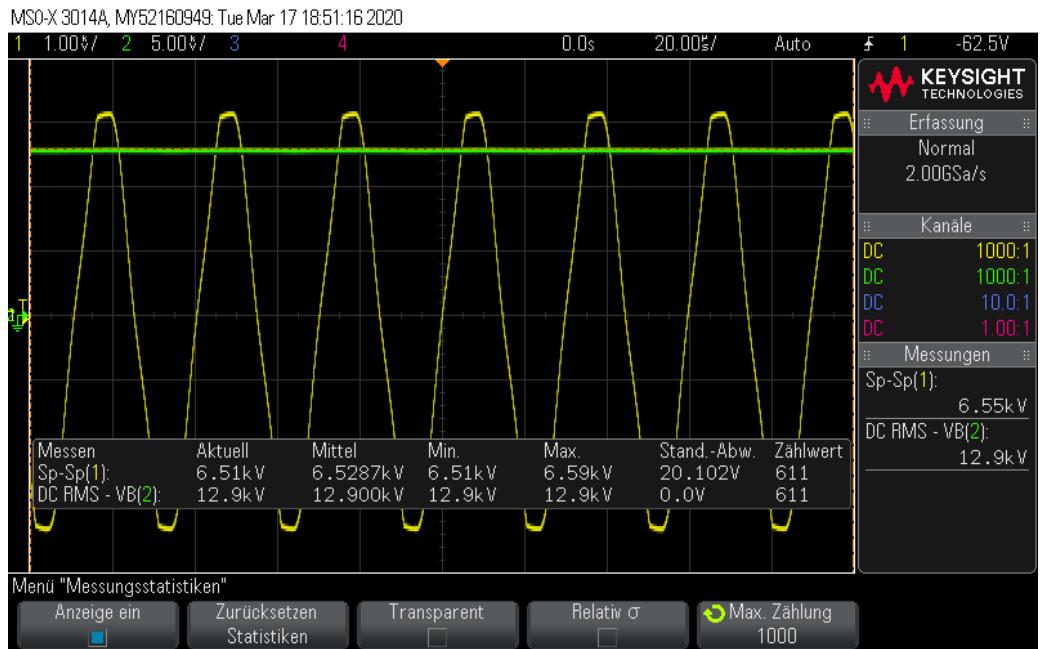


Figure 18: Verlauf von Eingangs- und Ausgangsspannung der mit $100M\Omega$ belasteten Greinacher Kaskade

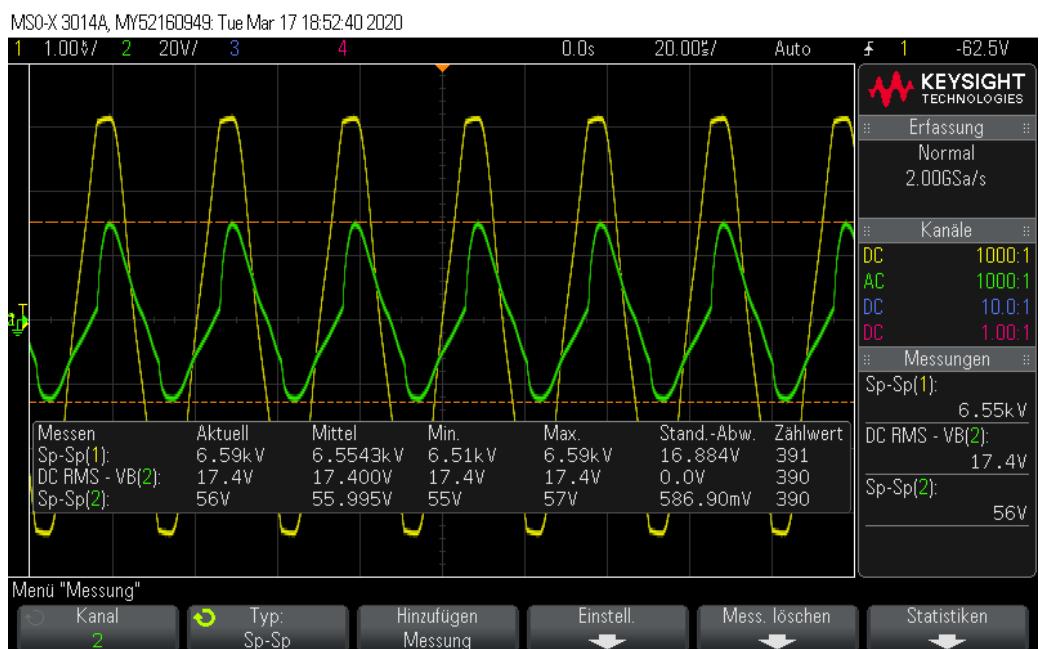


Figure 19: HVAC IN (gelb), Spannungsripple der DC-Spannung HVDC OUT (grün) für $100M\Omega$ belastete Greinacher Kaskade

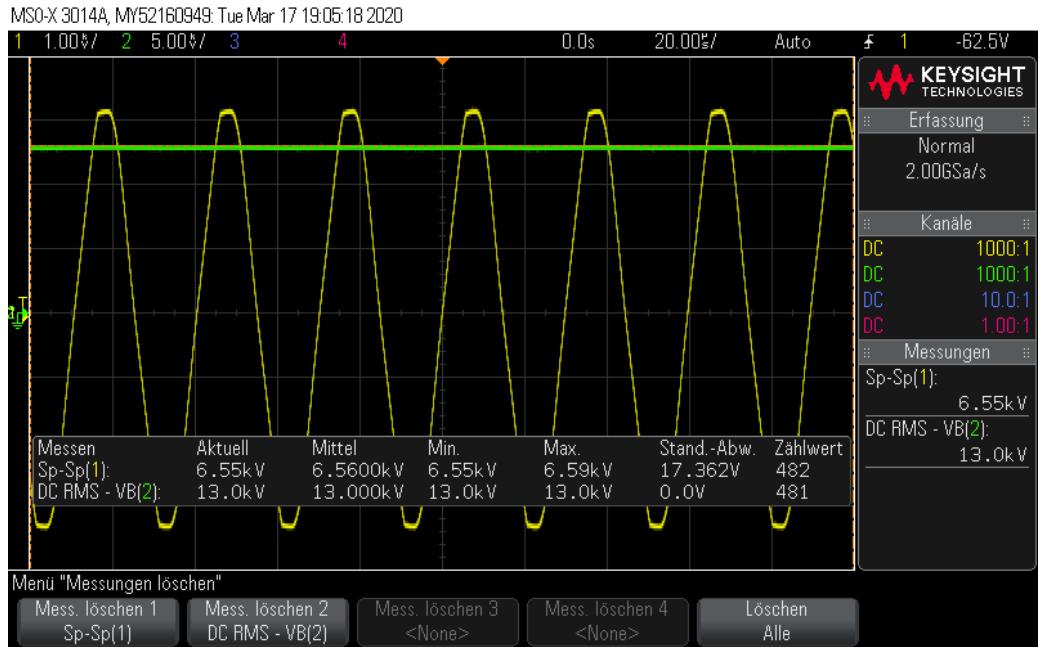


Figure 20: Spannung HVAC IN (gelb) und Glättungssäule II (grün) (unbelastet)

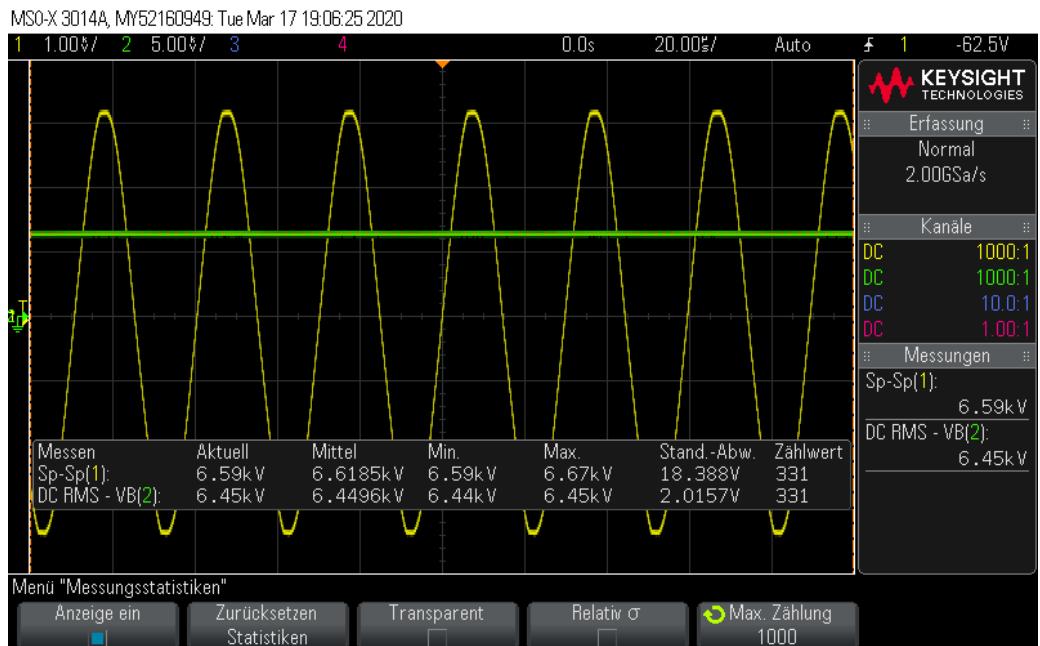


Figure 21: HVAC IN (gelb) und Spannung Glättungsstufe I (grün)

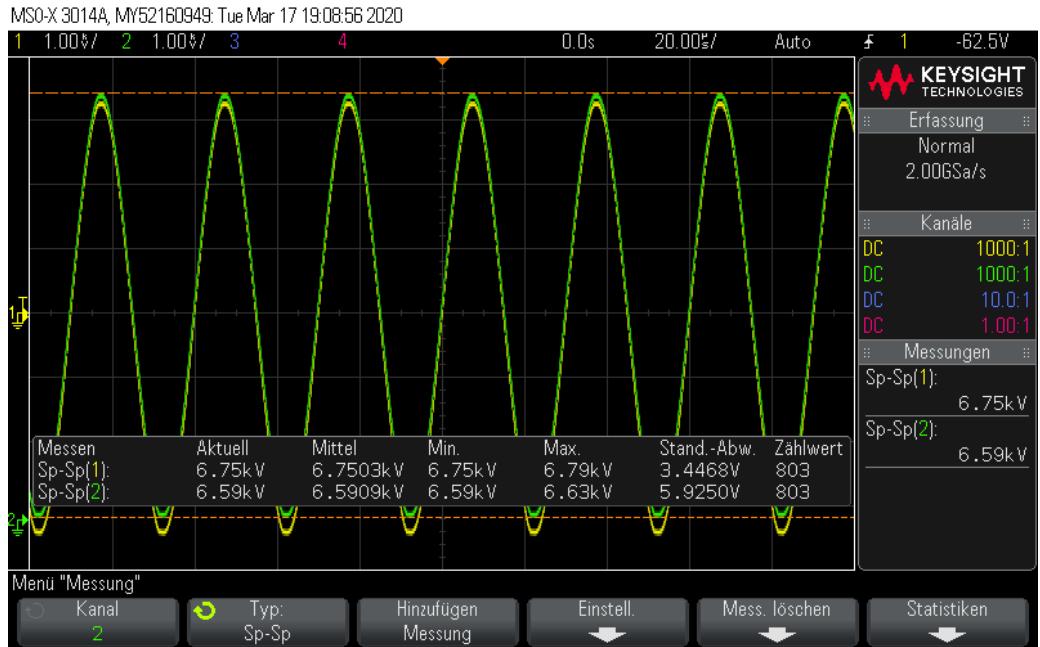


Figure 22: HVAC IN (gelb) und Spannung Schubsäule I (grün)

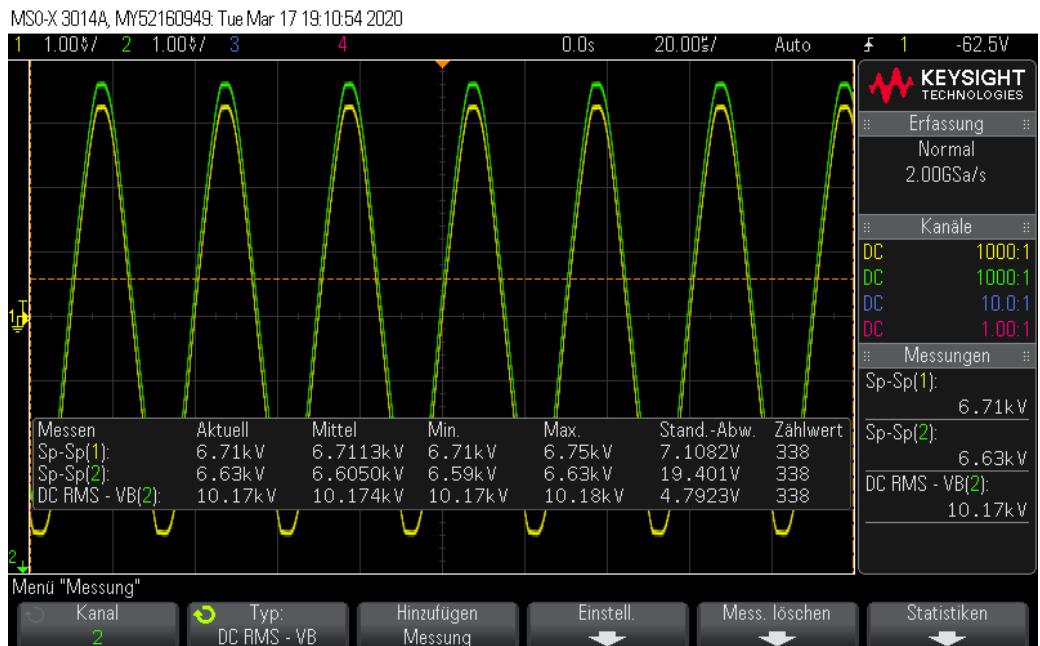


Figure 23: HVAC IN (gelb) und Spannung Schubsäule II (grün)

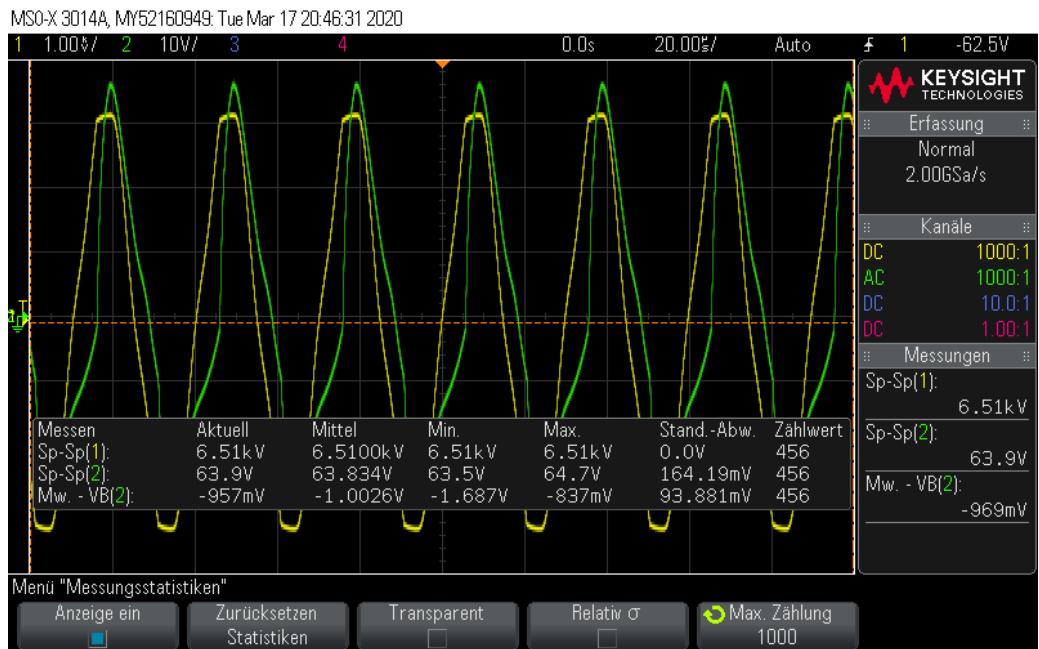


Figure 24: HVAC IN (gelb) und Spannungsrippel DC-Spannung HVDC OUT (grün) für $50M\Omega$

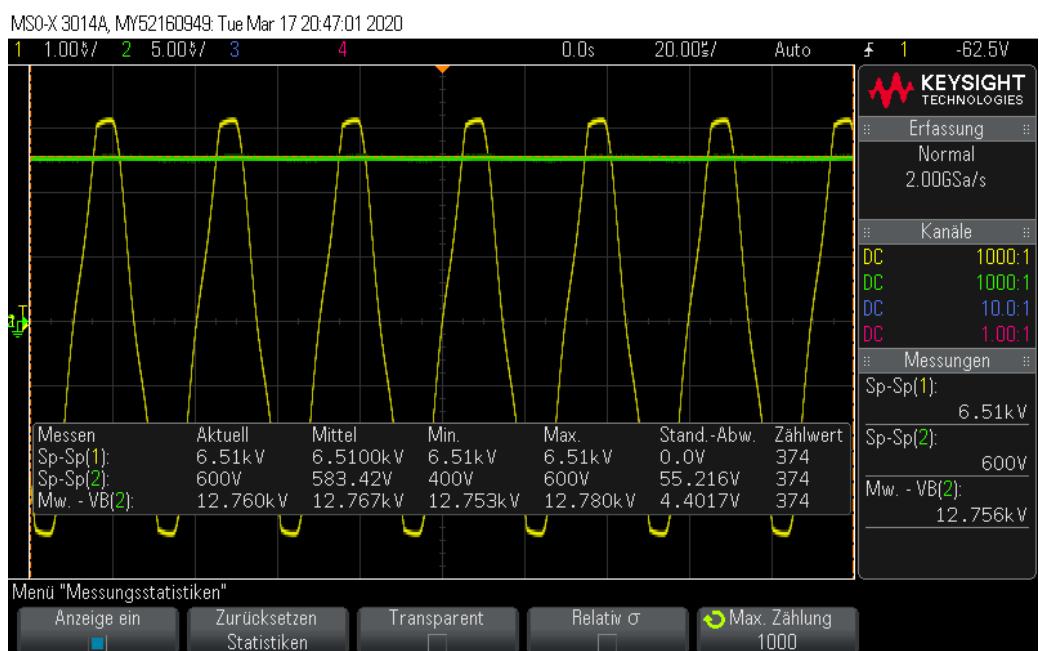


Figure 25: Zeitlicher Verlauf der Eingangs- (gelb) und Ausgangsspannung (grün) der **belasteten** Greinacher Kaskade für $50M\Omega$

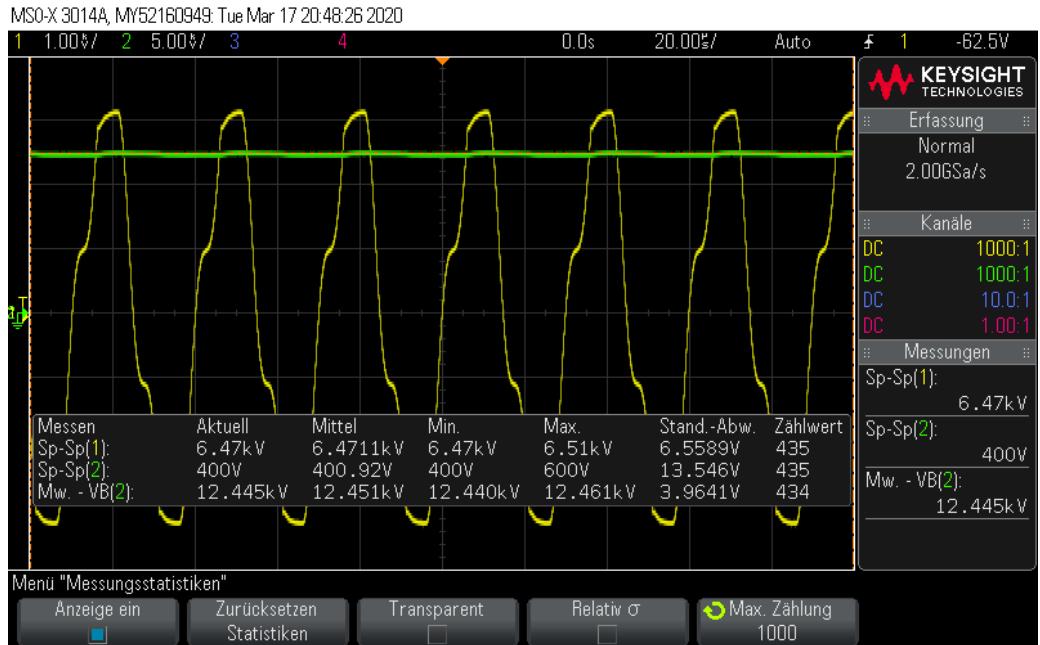


Figure 26: Zeitlicher Verlauf der Eingangs- (gelb) und Ausgangsspannung (grün) mit $10M\Omega$

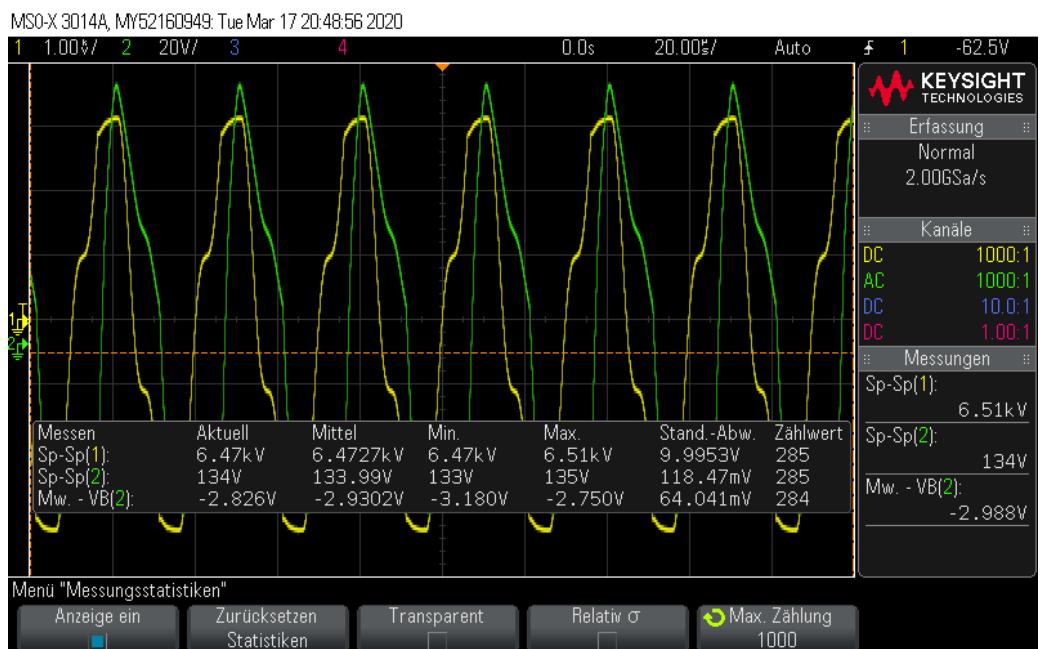


Figure 27: HVAC IN (gelb) und Spannungsrippel DC-Spannung HVDC OUT (grün) mit $10M\Omega$

6.1.3 2-stufige Greinacherkaskade mit 10nF Kondensatoren

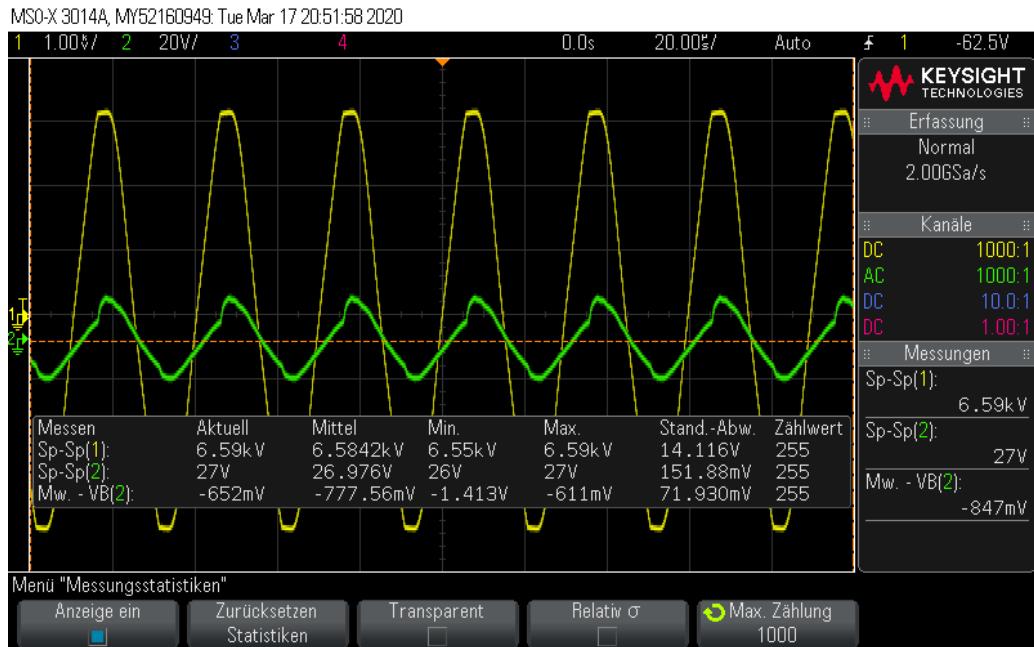


Figure 28: HVAC IN (gelb) und Spannungsrippel DC-Spannung HVDC OUT (grün) der unbelasteten Greinacher Kaskade

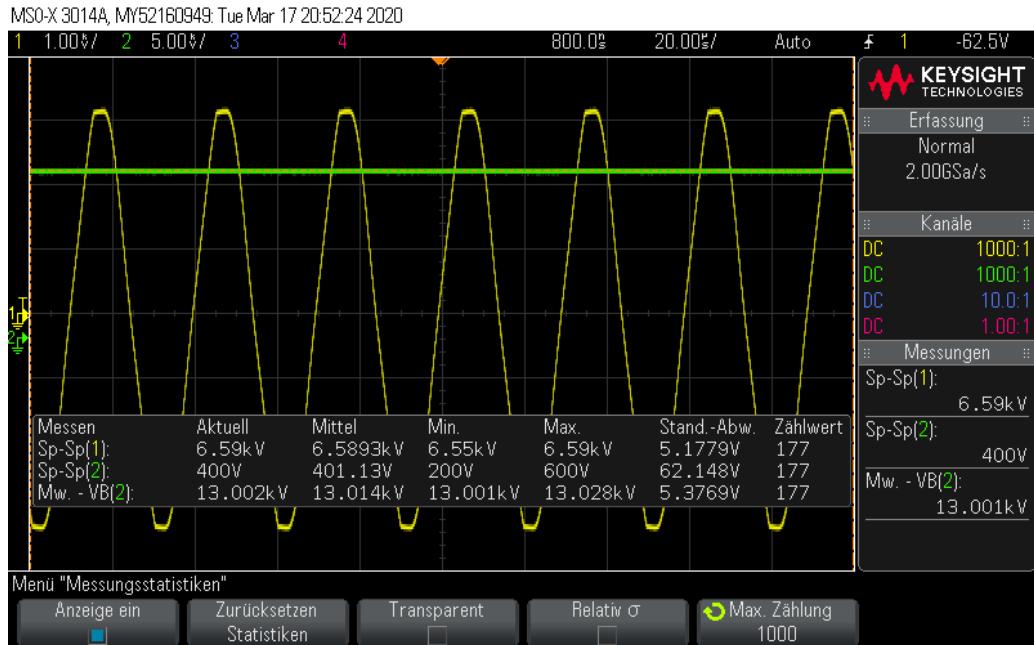


Figure 29: Zeitlicher Verlauf der Eingangs- (gelb) und Ausgangsspannung (grün) der unbelasteten Greinacher Kaskade

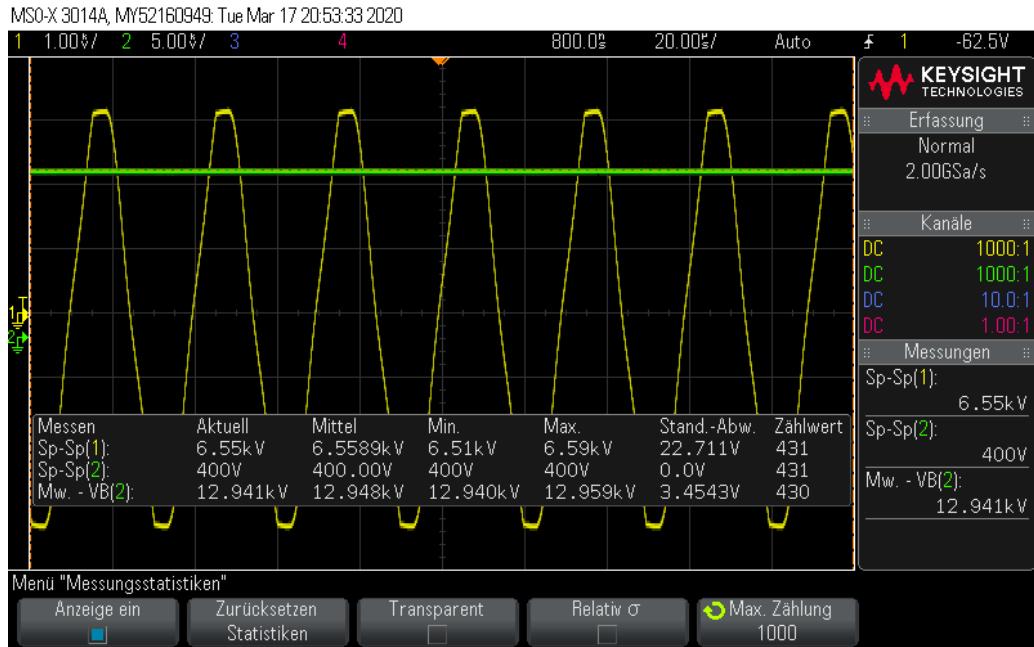


Figure 30: Zeitlicher Verlauf der Eingangs- (gelb) und Ausgangsspannung (grün) $100M\Omega$

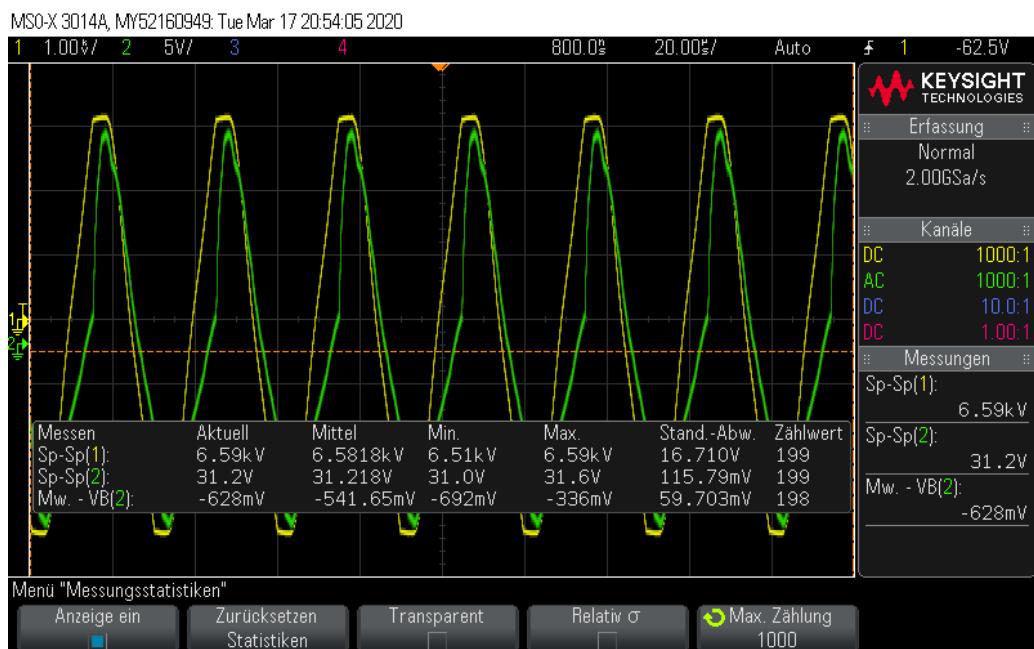


Figure 31: HVAC IN (gelb) und Spannungsrippe DC-Spannung HVDC OUT (grün) $100M\Omega$

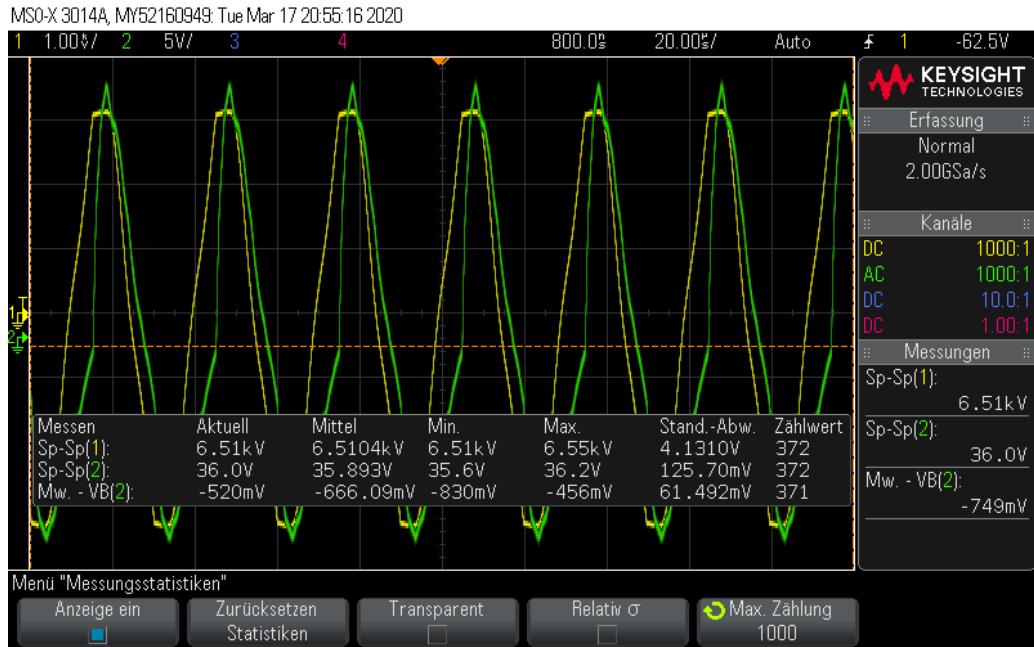


Figure 32: HVAC IN (gelb) und Spannungsrippe DC-Spannung HVDC OUT (grün) 50MΩ

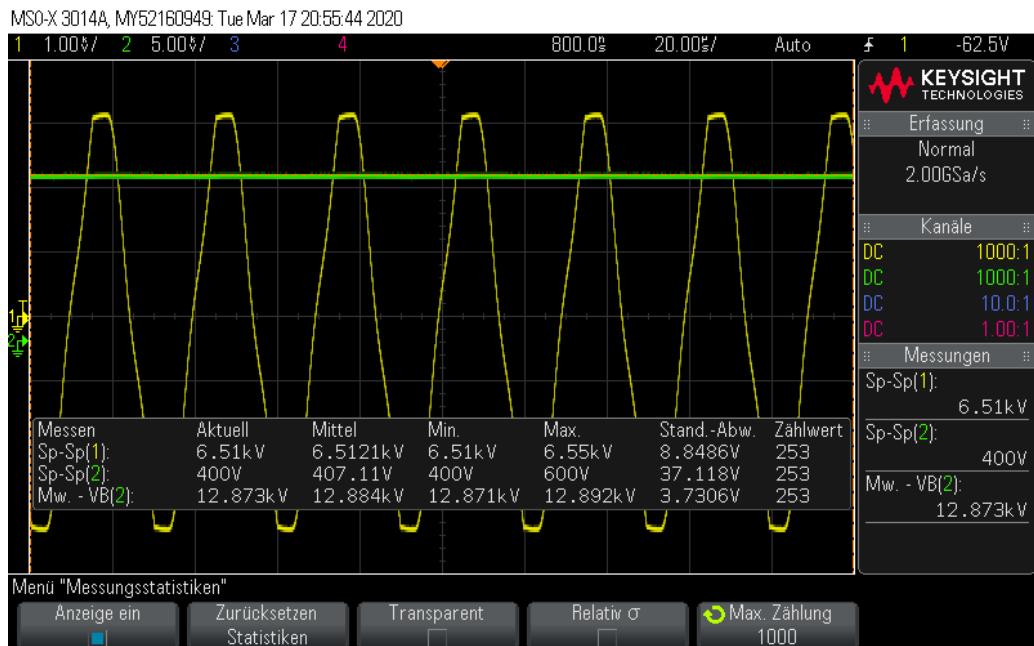


Figure 33: Zeitlicher Verlauf der Eingangs- (gelb) und Ausgangsspannung (grün) 50MΩ

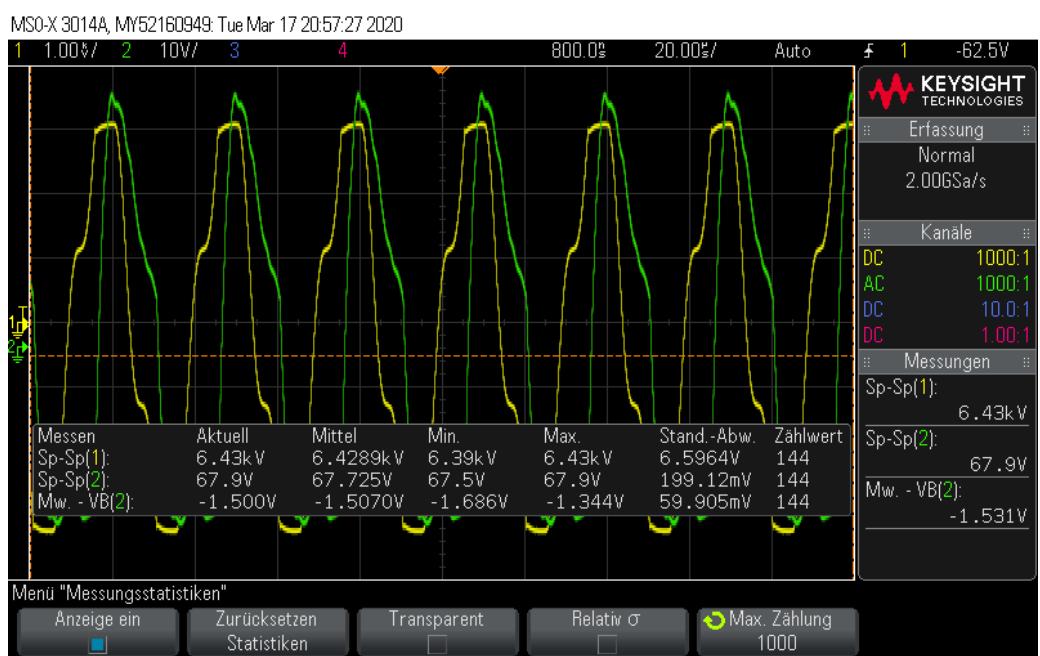


Figure 34: HVAC IN (gelb) und Spannungsrippe DC-Spannung HVDC OUT (grün) $10M\Omega$

6.2 Diagramme und Schaltungen der Simulation

Hier ist zu erwähnen, dass nur der eingeschwungene Zustand gefragt war.

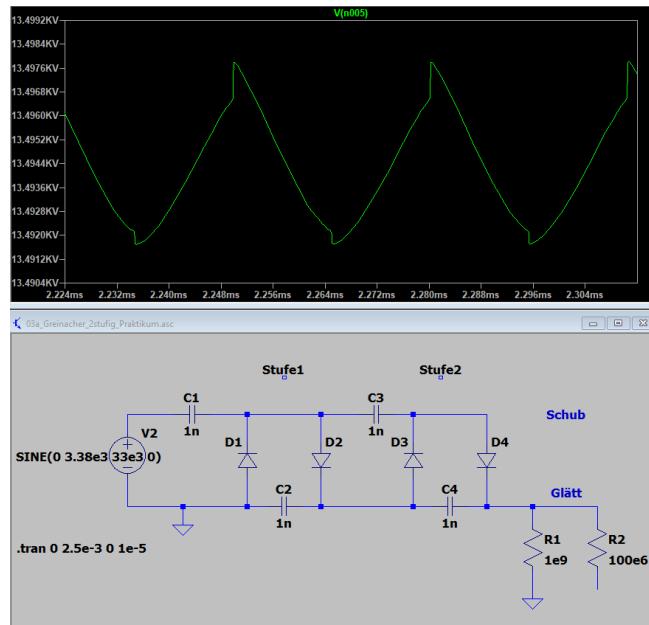


Figure 35: Simulation der Ausgangsspannung einer unbelasteten zweistufigen Greinacherkaskade mit $1nF$ Kondensatoren.

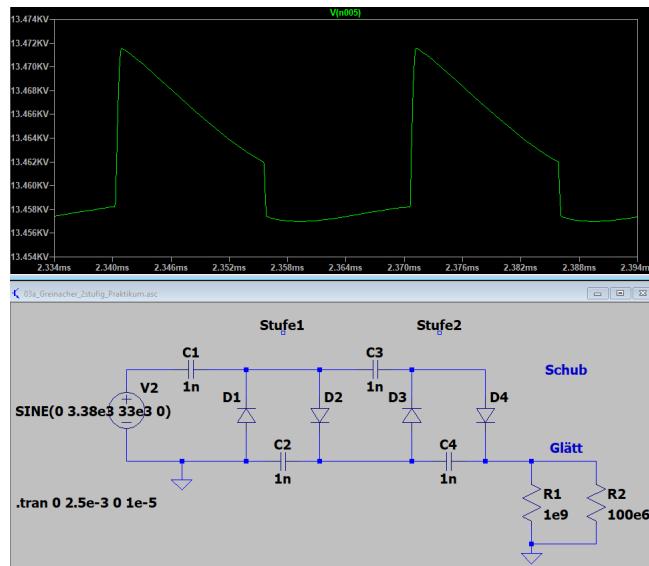


Figure 36: Simulation der Ausgangsspannung einer mit $100 M\Omega$ belasteten zweistufigen Greinacherkaskade mit $1nF$ Kondensatoren.

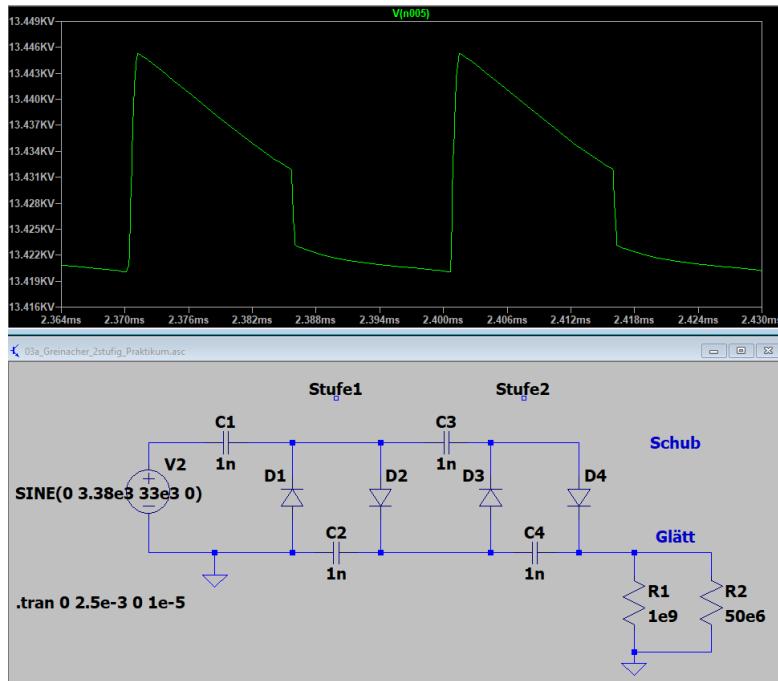


Figure 37: Simulation der Ausgangsspannung einer mit $50 \text{ M}\Omega$ belasteten zweistufigen Greinacherkaskade mit 1nF Kondensatoren.

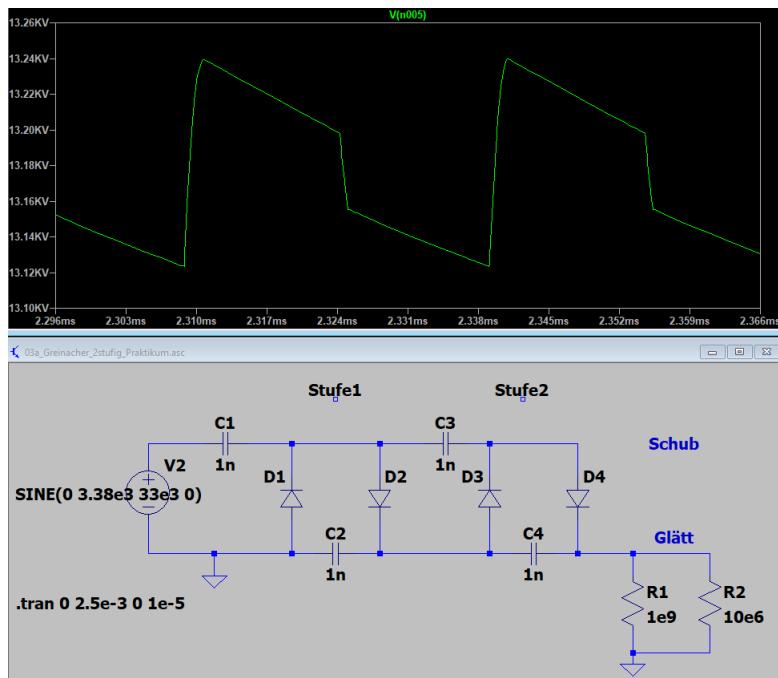


Figure 38: Simulation der Ausgangsspannung einer mit $10 \text{ M}\Omega$ belasteten zweistufigen Greinacherkaskade mit 1nF Kondensatoren.

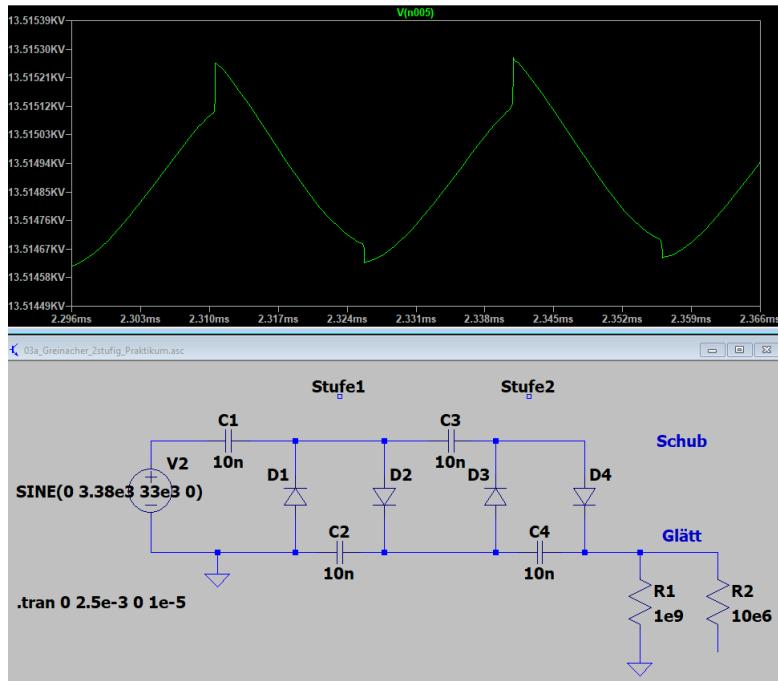


Figure 39: Simulation der Ausgangsspannung einer unbelasteten zweistufigen Greinacherkaskade mit 10nF Kondensatoren.

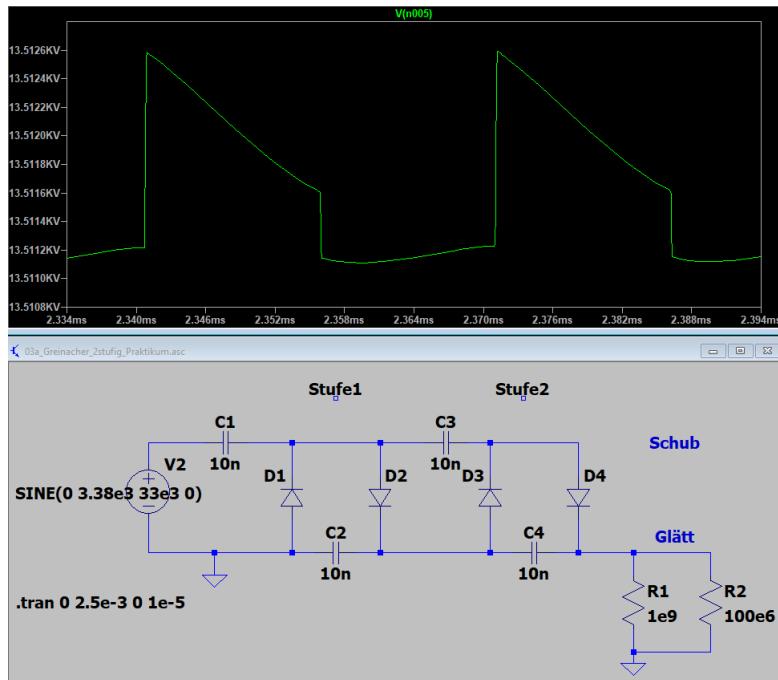


Figure 40: Simulation der Ausgangsspannung einer mit $100 \text{ M}\Omega$ belasteten zweistufigen Greinacherkaskade mit 10nF Kondensatoren.

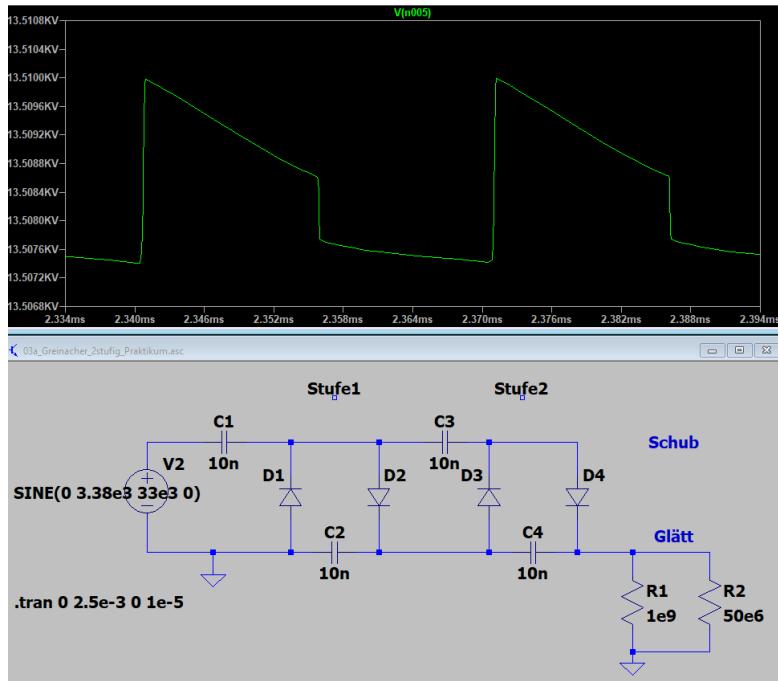


Figure 41: Simulation der Ausgangsspannung einer mit $50 \text{ M}\Omega$ belasteten zweistufigen Greinacherkaskade mit 10nF Kondensatoren.

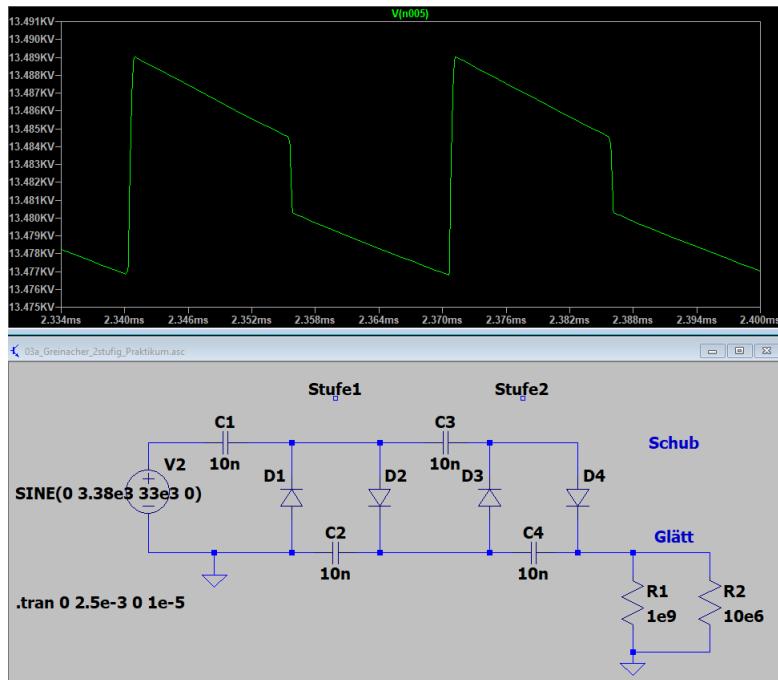


Figure 42: Simulation der Ausgangsspannung einer mit $10 \text{ M}\Omega$ belasteten zweistufigen Greinacherkaskade mit 10nF Kondensatoren.