

HOCHSCHULE RHEINMAIN



ELEKTRONIK 2

Praktikumsübung

Nr. 3

Autoren

CIHAN ÜNLÜ

DENNIS HUNTER

FACHBEREICH INGENIEURWISSENSCHAFTEN

STUDIENBEREICH ANGEWANDTE PHYSIK & MEDIZINTECHNIK

Datum LV: 31. Mai 2021

Datum der Abgabe: 21. Juni 2021

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Vorbereitung | 3 |
| 2 | Simulation | 5 |
| 2.1 | Ausgangsspannung | 6 |
| 2.2 | Schaltfrequenz | 7 |
| 2.3 | Verhalten bei Sprüngen der Eingangsspannung | 7 |
| 2.4 | Verhalten bei Lastsprüngen | 8 |
| 2.5 | Innenwiderstand | 8 |
| 2.6 | Restwelligkeit | 9 |
| 2.7 | Wirkungsgrad | 9 |
| 3 | Fazit | 11 |
| | Abbildungsverzeichnis | 12 |
| | Tabellenverzeichnis | 13 |
| | Glossar | 14 |
| A | Externe Referenzen | 15 |
| B | Anhang | 16 |
| | Literatur | 17 |

1 Vorbereitung

Untersucht wird das Verhalten eines integrierten Spannungsinverters (i.e. Ladungspumpenwandler) vom Typ *LT1054* des Herstellers TEXAS INSTRUMENTS. Es wird von der in Kapitel 8.2 *Typical Application* des Datenblattes [2] angegebenen Grundsaltung ausgegangen. Hierin sind die beiden Widerstände R_1 und R_2 so zu dimensionieren, dass sich eine Ausgangsspannung von $U_{out} = (-5 \pm 0.1) \text{ V}$ einstellt.

$$R_2 = R_1 \left(\frac{|U_{out}|}{\frac{U_{ref}}{2} - 40 \text{ mV}} + 1 \right) \quad (1.1)$$

Zur Dimensionierung gibt das Datenblatt unter Kapitel 7.3.1 eine Beispielrechnung ausgehend von einer gewünschten Ausgangsspannung von -5 V und $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ gemäß Gleichung (1.1) an. Mit der internen Referenzspannung von $U_{ref} = 2,5 \text{ V}$ und Wahl der Widerstände aus der E12 Reihe ergibt sich hier rechnerisch ein Wert für R_2 von

$$R_2 = 22 \text{ k}\Omega \left(\frac{|-5 \text{ V}|}{\frac{2,5 \text{ V}}{2} - 40 \text{ mV}} + 1 \right) \approx 112,91 \text{ k}\Omega \quad (1.2)$$

mit dem nächstliegenden Wert der E12-Reihe von $120 \text{ k}\Omega$.

Umstellen von Gleichung (1.1) nach U_{out} und einsetzen von R_1 und R_2 ergibt für diesen Fall eine Ausgangsspannung von

$$U_{out} = \left(\frac{2,5 \text{ V}}{2} - 40 \text{ mV} \right) \cdot \left(1 - \frac{120 \text{ k}\Omega}{20 \text{ k}\Omega} \right) = -6,05 \text{ V} \quad (1.3)$$

was weit außerhalb der gesuchten Toleranz liegt.

Abbildung 1.1 zeigt die Ausgangsspannung für weitere Kombinationen des Widerstandspaares unter Berücksichtigung der im Datenblatt empfohlenen Minimal- und Maximalwerte von $R_1 \geq 20 \text{ k}\Omega$ und $100 \text{ k}\Omega \leq R_2 \leq 300 \text{ k}\Omega$ (Code zu finden in Anhang B).

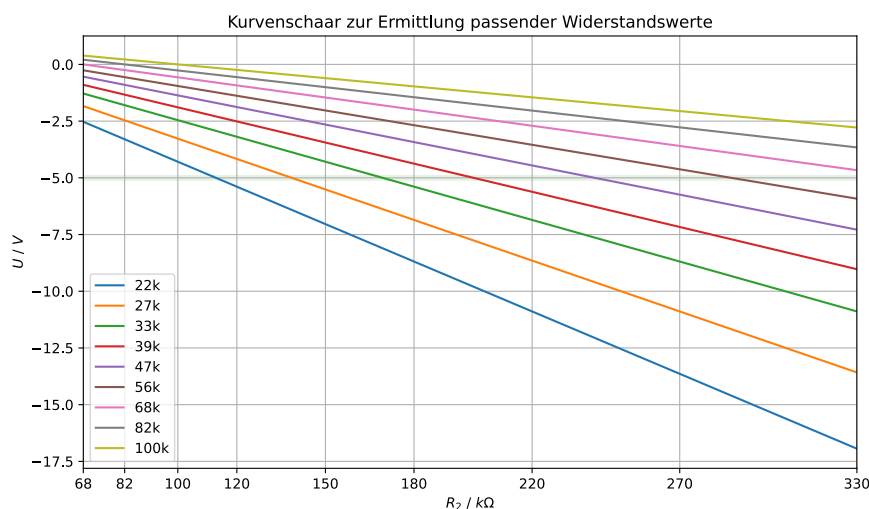


Abb. 1.1: Kurvenschaar zur Ermittlung passender Widerstandswerte. Grün hinterlegt ist die akzeptable Abweichung der Ausgangsspannung vom Sollwert.

Es zeigt sich, dass es für keine Kombination zweier Einzelwerte aus der E12-Reihe eine passende Kombination finden lässt. Um dem zu entgegen wird R_2 durch zwei Einzelwiderstände in Reihe mit $100\text{ k}\Omega$ und $12\text{ k}\Omega$ ersetzt. Hieraus ergibt sich nach obiger Gleichung eine Ausgangsspannung von

$$U_{out} = -4,95\text{ V} \quad (1.4)$$

Mit den Bauteilwerten zur *Typical Application* die im Abschnitt 8.2 des Datenblattes entnommen werden können und den ermittelten Werten für R_1 , R_2 lässt sich nach Abschnitt 8.2.2.3 *Output Ripple* die Restwelligkeit am Ausgang der Schaltung abschätzen.

$$\Delta U = \frac{I_{out}}{2 \cdot f \cdot C_4} + 2 \cdot I_{out} \cdot R_{ESR} \quad (1.5)$$

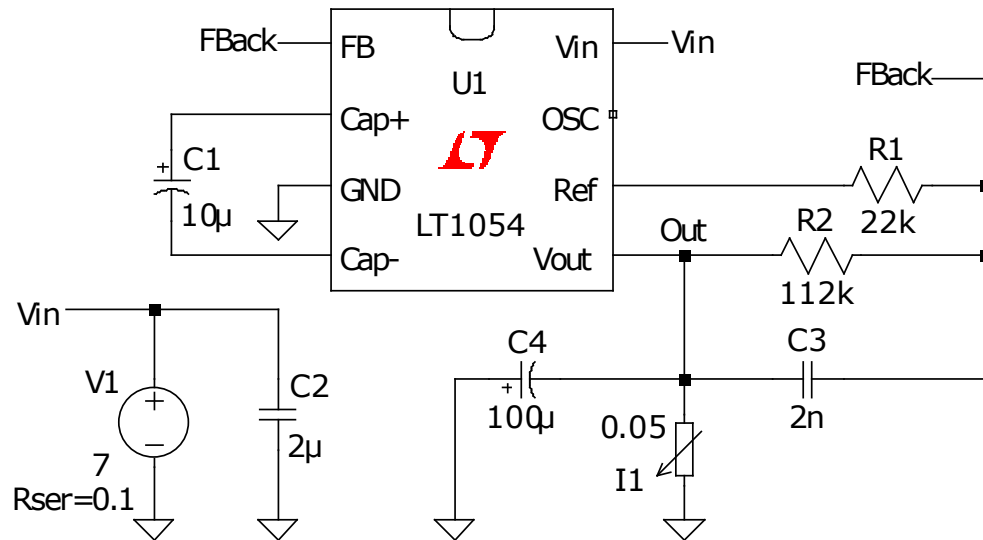
In Gleichung (1.5) ist f die Oszillatorfrequenz, die im Datenblatt mit 25 kHz angegeben wird. Mit $100\text{ }\mu\text{F}$ für C_4 und einem Laststrom von 25 mA errechnet sich für die Ausgangsspannung ein Spitze-Spitze-Wert von

$$\Delta U = \frac{25\text{ mA}}{2 \cdot 25\text{ kHz} \cdot 100\text{ }\mu\text{F}} = 5\text{ mV} \quad (1.6)$$

Besitzt der Kondensator am Ausgang jedoch einen nennenswert hohen Serienwiderstand, so darf der zweite Term in Gleichung (1.5) nicht mehr vernachlässigt werden. So erhöht sich die Restwelligkeit bei einem Serienwiderstand von $0,05\text{ }\Omega$ auf $7,5\text{ mV}$ was einem Anstieg von 150% entspricht.

2 Simulation

Abbildung 2.1 zeigt die in den Simulationen verwendete Grundsaltung.



.tran 10ms startup

Abb. 2.1: Grundsaltung des LT1054 gemäß Kapitel 8.2 *Typical Application* des Datenblattes.

2.1 Ausgangsspannung

Zunächst wird das Einschaltverhalten der Schaltung untersucht. Hierzu wird eine Simulation der Schaltung wie sie in Abb. 2.1 zu sehen ist durchgeführt. Abbildung 2.2 zeigt den Verlauf der Ausgangsspannung U_{out}

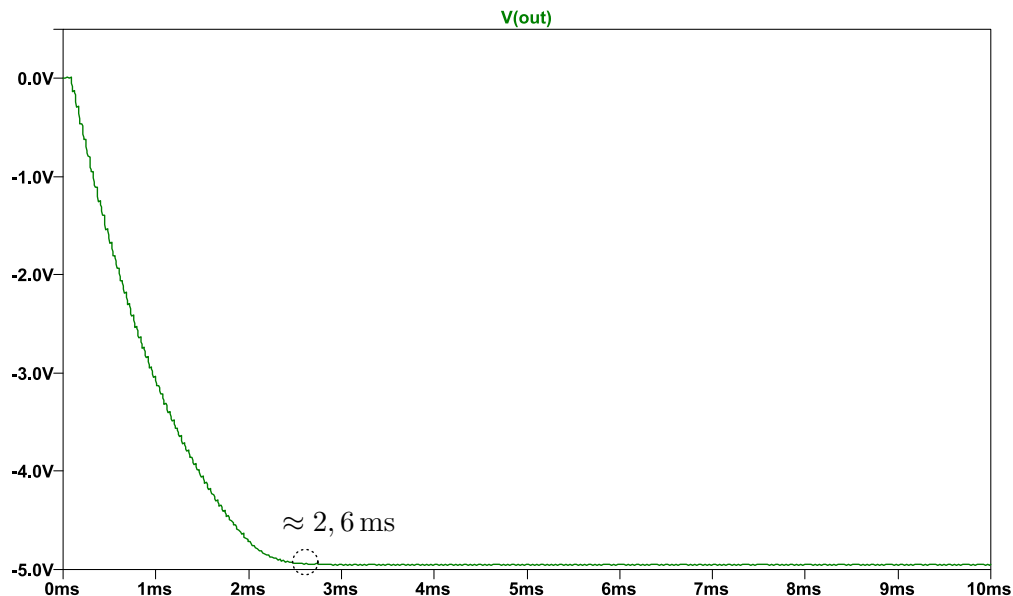


Abb. 2.2: Verlauf der Ausgangsspannung bis 10 ms nach dem Einschaltmoment.

nach dem Einschalten. Es ist zu erkennen, dass sich die erwartete Ausgangsspannung erst etwa 2,6 ms nach dem Einschalten einstellt.

Im eingeschwungenen Zustand beträgt die mittlere Spannung \bar{U}_{out} am Ausgang des *LT1054* $-4,9506\text{ V}$. Während der simulierte Wert mit einer Abweichung von $0,6\text{ mV}$ als deckungsgleich mit dem in Gleichung (1.4) gefundenen rechnerischen Wert angenommen werden kann, liegt er auch gut im vom Hersteller angegebenen Intervall für *Regulated output Voltage* von $-4,7\text{ V} \leq U_{out} \leq -5,2\text{ V}$ (vgl. Abb. A.1).

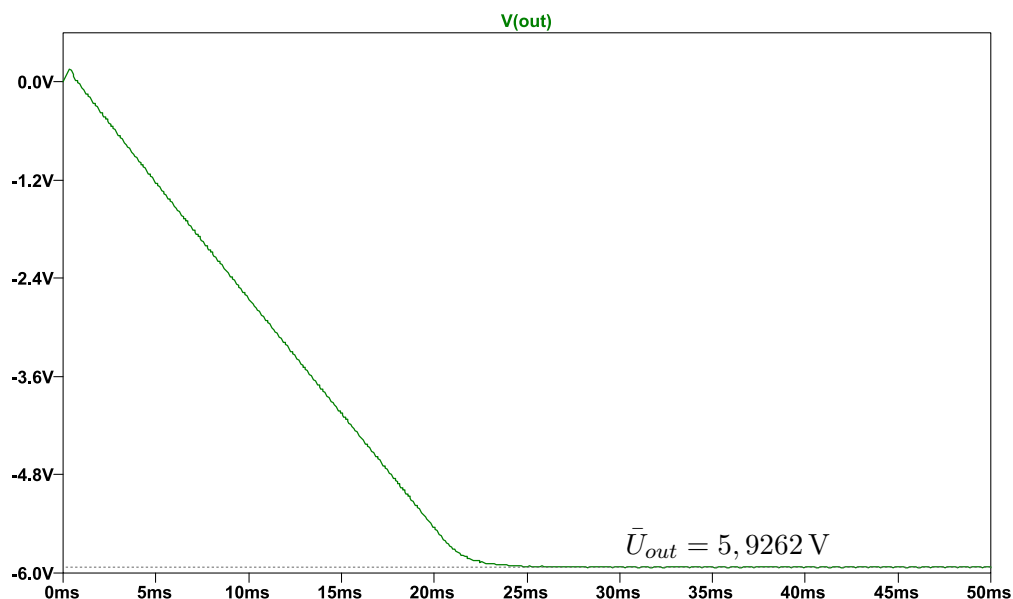


Abb. 2.3: Verlauf der Ausgangsspannung bei Abwesenheit von R_1 und R_2 . Im eingeschwungenen Zustand beträgt die mittlere Spannung am Ausgang des Spannungsinverters etwa $5,9262\text{ V}$. Das Zeitintervall, bis der eingeschwungene Zustand erreicht ist erhöht sich deutlich.

Nach Kapitel 7.1 des Datenblattes entspricht $U_{out} \approx -U_{in}$, wenn das Bauteil durch Entfernen der Wider-

stände R_1 und R_1 als unregelter Spannungsinverter betrieben wird. Die Differenz aus $U_{in} - |U_{out}|$ wird als *Voltage loss* bezeichnet und mit einem typischen Wert von 0,35 V bis 1,1 V (maximal 0,55 V und 1,6 V respektive) bei Lastströmen zwischen 10 mA und 100 mA angegeben. Eine Simulation bei Gleichhalten aller sonstiger Parameter – insbesondere des Laststromes – zeigt eine mittlere Spannung am Ausgang von 5,9262 V. Hier ergibt sich ein Spannungsverlust von

$$U_{loss} = 7 \text{ V} - 5,9262 \text{ V} = 1,0738 \text{ V} \quad (2.1)$$

was angesichts eines simulierten Laststromes von 50 mA erkennbar über dem typischen Wert, jedoch noch unterhalb des maximalen Wertes liegt.

2.2 Schaltfrequenz

Die Schaltung in Abb. 2.1 wird auf Periodendauer bzw. Frequenz des internen Oszillators hin überprüft. Hierzu werden die zuvor entfernten Regelungswiderstände wieder hinzugefügt, die Schaltung mit 50 mA belastet und eine Simulation mit der Anweisung `.tran 10ms startup` gestartet. Ein Plot des Spannungsverlaufs am OSC-Anschluss des Spannungsinverters im Zeitbereich 3 ms bis 3,5 ms zeigt hier eine Periodendauer von $T = 39,58 \mu\text{s}$ bzw. eine Frequenz von $f = T^{-1} \approx 25,26 \text{ Hz}$. Das Datenblatt gibt unter Kapitel 6.5 *Electrical Characteristics* eine Oszillatorfrequenz von $25 \pm 10 \text{ kHz}$ an. Der Wert der Simulation liegt somit gut an der Angabe des Herstellers für den typischen Wert.

2.3 Verhalten bei Sprüngen der Eingangsspannung

Unter *Electrical Characteristics* wird unter *Input regulation* ein Wert für $\Delta U_{out,max}$ von 25 mV angegeben. Die Prüfbedingungen des Herstellers sahen hierbei Kapazitäten von $C_1 = 10 \mu\text{F}$, $C_3 = 2 \text{ nF}$ und $C_4 = 100 \mu\text{F}$ vor. Für C_1 und C_4 werden hier aufgrund ihres vergleichsweise geringen Serienwiderstandes Tantal-Varianten empfohlen. In der Simulation werden die Kapazitätswerte angepasst und für die betreffenden Kondensatoren die parasitären Serienwiderstände auf 0 gesetzt. Eine Simulation mit den Si-

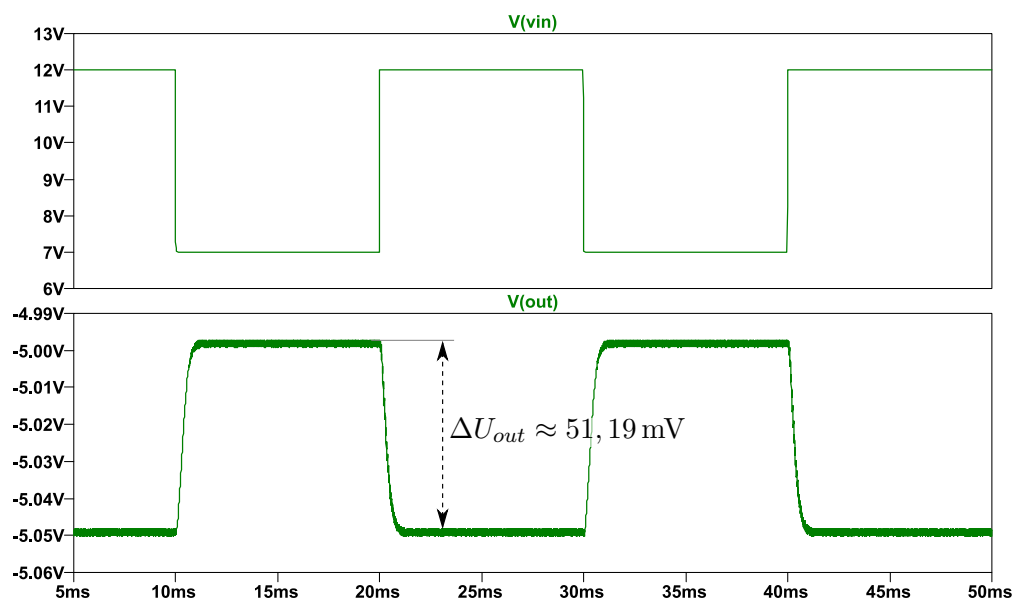


Abb. 2.4: Verlauf der Ausgangsspannung U_{out} (unten) bei einem der Eingangsspannungsquelle überlagerten Rechtecksignal von 5 V (oben). Zu erkennen ist ein den Eingangsseitigen Spannungssprüngen folgende, rechteckförmige Überlagerung der Ausgangsspannung von $\Delta U_{out} \approx 51,19 \text{ mV}$.

mulationsanweisungen `PULSE(0 5 1p 1p 1p 10ms 20ms)` für das überlagerte Rechtecksignal und

.tran 200ms startup zeigt im Zeitbereich zwischen 5 ms und 50 ms den in Abb. 2.4 gezeigten Spannungsverlauf. Zu erkennen ist ein der Ausgangsspannung überlagertes und der Eingangsspannung folgendes Rechtecksignal. ΔU_{out} beträgt hier etwa 51,19 mV. Es ist an dieser Stelle etwas erstaunlich, dass der Wert beim doppelten des vom Hersteller angegebenen Wertes für das Maximum liegt. Erklärungsversuche das idealisierte Verhalten der verwendeten Komponenten betreffend haben das Simulationsergebnis nicht nennenswert geändert.

2.4 Verhalten bei Lastsprüngen

Nun wird das Verhalten der Schaltung rechteckförmigen Lastsprüngen untersucht. Die in der Simulation nachzubildenden Testbedingungen sehen Lastsprünge zwischen 10 mA und 50 mA vor. Alle anderen Werte werden gegenüber der Simulation in Abschnitt 2.3 gleich gehalten. Der rechteckförmigen Signalform der

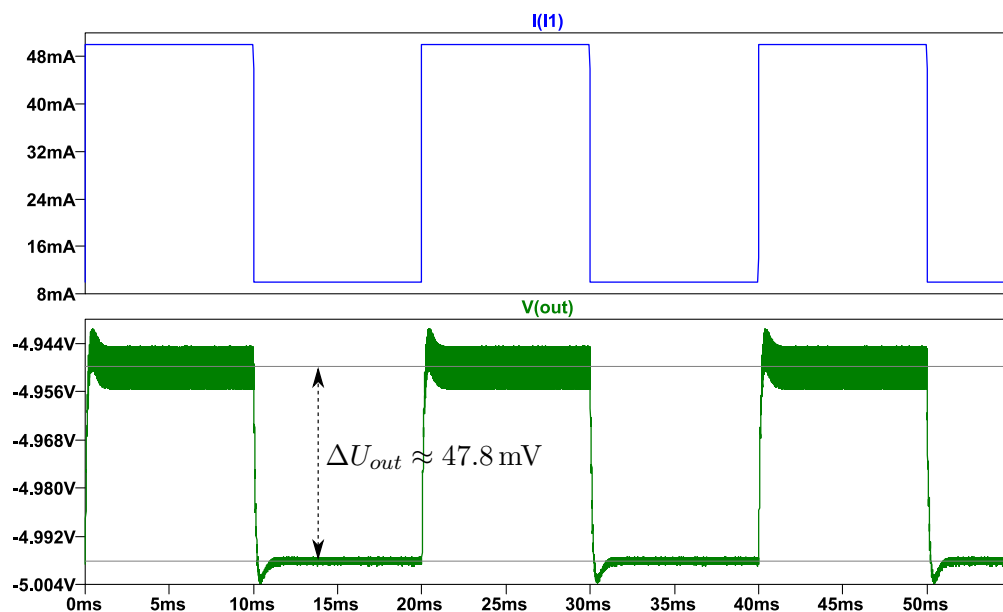


Abb. 2.5: Verhalten der Ausgangsspannung bei Lastsprüngen zwischen 10 mA und 50 mA.

Ausgangsspannung ist eine Restwelligkeit überlagert. Aus diesem Grunde wurden zwei separate Simulationen in den Bereichen durchgeführt, in denen das Signal einen niedrigen bzw. hohen Pegel besitzt. Hier wurde anschließend vom Simulationsprogramm der Mittelwert errechnet und ausgegeben. Die Differenz beider Mittelwerte liefert hier, wie in Abb. 2.5 dokumentiert, ein ΔU_{out} von 47,8 mV.

2.5 Innenwiderstand

Der Innenwiderstand der Schaltung ist gegeben durch

$$R_i = \frac{|\Delta \bar{U}_{out}|}{\Delta I_{load}} \quad (2.2)$$

wobei hier $\Delta \bar{U}_{out}$ den Unterschied der Ausgangsspannung bei verschiedenen Belastungen bezeichnet. Simulationen mit Lastströmen von 10 mA und 100 mA im Zeitbereich zwischen 15 ms und 20 ms nach dem Einschalten ergeben die in Tabelle 2.1 gelisteten Werte.

Tab. 2.1: Ausgangsspannung in Abhängigkeit des Laststromes mit und ohne Regelungsrückführung.

| | U_{out} (10 mA) | U_{out} (100 mA) | Diff |
|-------------|-------------------|--------------------|----------|
| Reguliert | -4,9984 V | -4,8914 V | 107 mV |
| Unreguliert | -6,3868 V | -5,3565 V | 1,0303 V |

Rechnerisch ergeben sich somit dynamische Innenwiderstände von

$$R_{i,reg} = \frac{4,9984 \text{ V} - 4,8914 \text{ V}}{90 \text{ mA}} \approx 1,19 \Omega \quad (2.3)$$

$$R_{i,unreg} = \frac{6,3868 \text{ V} - 5,3565 \text{ V}}{90 \text{ mA}} \approx 11,45 \Omega \quad (2.4)$$

Zunächst ist auffällig, dass der Innenwiderstand signifikant ansteigt, wenn der Spannungsinverter unreguliert betrieben wird. Dieser Wert liegt jedoch nah an der Angabe des Herstellers unter *Output resistance* mit 10Ω (typisch) (vgl. Abb. A.1).

2.6 Restwelligkeit

Die Güte der Ausgangsspannung bezüglich ihrer Restwelligkeit wird untersucht, indem der Laststrom auf 25 mA festgelegt und die Simulationsanweisung dahingehend geändert wird, dass der Verlauf der Ausgangsspannung im eingeschwungenen Zustand dargestellt wird. In Abb. 2.6a zeigt sich so eine Restwelligkeit von $\Delta U_{out} \approx 5,4 \text{ mV}$. Um ein weniger idealisiertes Bild der Situation zu erhalten wurden für den Verlauf in Abb. 2.6b die beiden Kondensatoren C_1 und C_4 zu realen Aluminium-Elektrolyt Kondensatoren geändert. Hier wurde sich absichtlich über die Empfehlung des Herstellers Tantal-Kondensatoren zu verwenden hinweg gesetzt, um die den Unterschied hervorzuheben. In diesem Fall erhöht sich die Restwelligkeit um eine Zehnerpotenz auf $34,3 \text{ mV}$. Gleichzeitig aber ist eine deutliche Verzerrung des Spannungsverlaufes zu erkennen.

Es zeigt sich, dass sich der parasitäre Widerstand von C_4 sehr viel stärker sowohl auf die Verzerrung, als auch auf die Restwelligkeit der Ausgangsspannung auswirkt. Dies ist zu erwarten, da C_4 hier als Ladungsreservoir dient. Ein Serienwiderstand verzögert hier sein Laden was sich letztlich in der gezeigten Wellenform äußert.

2.7 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad der Schaltung ist durch

$$\eta = \frac{\bar{P}_{out}}{\bar{P}_{in}} \quad (2.5)$$

gegeben.

\bar{P}_{in} ist hier die von der Eingangsspannungsquelle abgegebene Leistung. \bar{P}_{out} die von der Last aufgenommene Leistung. Grundlage ist hier die Konfiguration aus Abschnitt 2.6.

Es ergibt sich ein Wirkungsgrad von

$$\eta = \frac{124,51 \text{ mW}}{190,24 \text{ mW}} \approx 0,654 \quad (2.6)$$

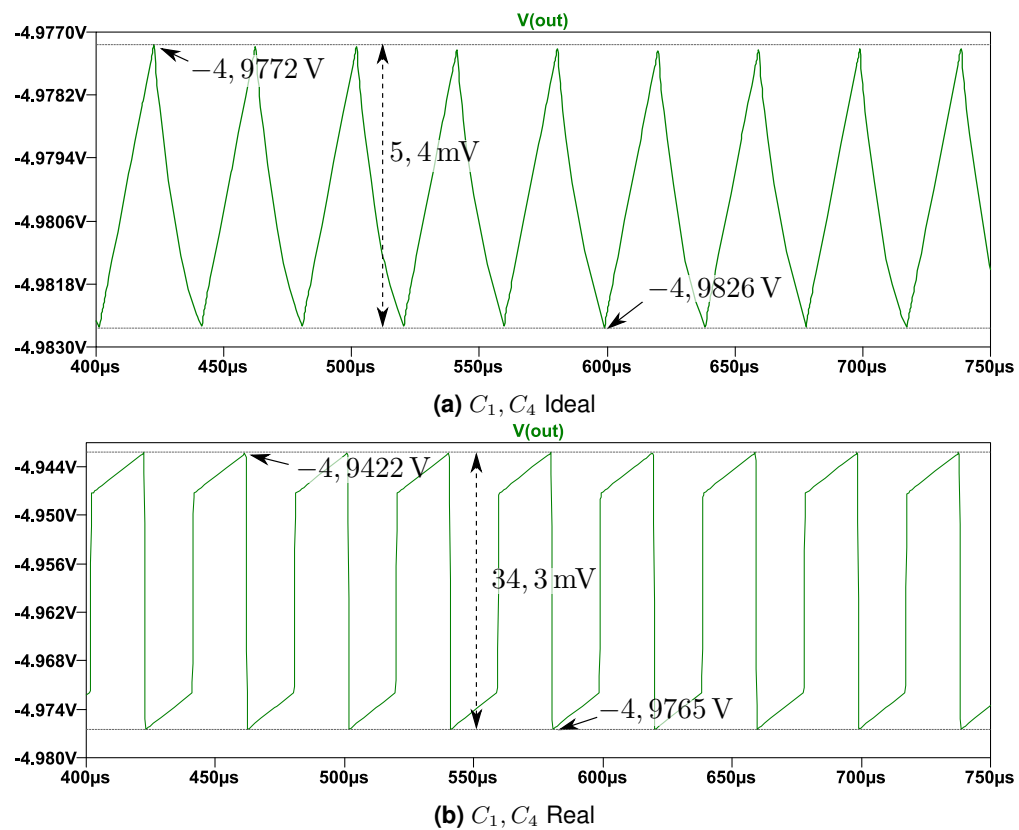


Abb. 2.6: Größe und Form der Restwelligkeit am Ausgang. (a) zeigt den Spannungsverlauf bei simulation mit idealen Kondensatoren. (b) zeigt den Verlauf bei Austausch von C_1 gegen einen realen Kondensator des types *UPR1C100MAH* und C_4 gegen einen des types *UPL1A101MPH*

3 Fazit

Der Praktikumsversuch hat gezeigt, dass sich zumindest beim untersuchte Spannungsinverter die Wahl der passiven Beschaltung drastisch auf die Performance der Schaltung auswirken kann.

Beim Versuch selbst war die größte Hürde das Simulationsprogramm selbst. So wurden Simulationen bisweilen nie abgeschlossen, Wellenformen wurde bei wiederholter Simulation aber ohne Veränderung der Parameter verschieden ausgegeben und ein mal kam es sogar zu einem Absturz des Programms. Dies ist in der Form bisher noch nicht passiert. Eine kurze Recherche deutet darauf hin, dass eine ungünstige Parametrisierung der Komponenten der Bibliothek und/oder der untersuchten Schaltung in manchen Fällen zu unvorhergesehenem Verhalten führen kann [1].

Als Workaround wurde sämtlichen Simulationsanweisungen `ui_c` hinzugefügt, was das Problem zumindest augenscheinlich lösen konnte.

Auch die Anleitung zum Praktikumsversuch war diesmal weniger gut verständlich. So wurde etwa ΔU_{aus} nicht konsequent für den gleichen Sachverhalt verwendet oder es war bisweilen nicht sofort ersichtlich, was konkret gemessen werden soll.

Zuletzt ist zu sagen, dass hier zwar die Verwendbarkeit in etwa eigenen Projekten noch fraglich ist, es aber nicht schaden kann das Bauteil und seine Charakteristika im Hinterkopf zu behalten.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Kurvenschaar zur Ermittlung passender Widerstandswerte | 3 |
| 2.1 | Grundsaltung des <i>LT1054</i> | 5 |
| 2.2 | Verlauf der Ausgangsspannung nach dem Einschaltmoment | 6 |
| 2.3 | Verlauf der Ausgangsspannung bei Abwesenheit von R_1 und R_2 | 6 |
| 2.4 | Verlauf der Ausgangsspannung bei rechteckförmigen Sprüngen der Eingangsspannung . . . | 7 |
| 2.5 | Verhalten der Ausgangsspannung bei Lastsprüngen | 8 |
| 2.6 | Größe und Form der Restwelligkeit am Ausgang. (a) zeigt den Spannungsverlauf bei simulation mit idealen Kondensatoren. (b) zeigt den Verlauf bei Austausch von C_1 gegen einen realen Kondensator des types <i>UPR1C100MAH</i> und C_4 gegen einen des types <i>UPL1A101MPH</i> | 10 |
| A.1 | Auszug des Kapitels 6.5 des Datenblattes zum <i>LT1054</i> | 15 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|---|
| 2.1 | Ausgangsspannung in Abhängigkeit des Laststromes mit und ohne Regelungsrückführung | 9 |
|-----|--|---|

Glossar

| | |
|------------|--|
| C | Kapazität F |
| I_{load} | Laststrom A |
| P | Leistung W |
| R_i | Innenwiderstand Ω |
| T | Periodendauer s |
| U_{in} | Eingangsspannung V |
| U_{loss} | Spannungsverlust im unregulierten Fall V |
| U_{out} | Ausgangsspannung des Netzteils V |
| f | Frequenz Hz |
| η | Wirkungsgrad |

A Externe Referenzen

6.5 Electrical Characteristics

over recommended operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

| PARAMETER | | TEST CONDITIONS | T _A ⁽¹⁾ | LT1054C, LT1054I | | | UNIT |
|------------------|--|---|-------------------------------|------------------|--------------------|------|------|
| | | | | MIN | TYP ⁽²⁾ | MAX | |
| V _O | Regulated output voltage | V _{CC} = 7 V, T _J = 25°C, R _L = 500 Ω ⁽³⁾ | 25°C | -4.7 | -5 | -5.2 | V |
| | Input regulation | V _{CC} = 7 V to 12 V, R _L = 500 Ω ⁽³⁾ | Full range | | 5 | 25 | mV |
| | Output regulation | V _{CC} = 7 V, R _L = 100 Ω to 500 Ω ⁽³⁾ | Full range | | 10 | 50 | mV |
| | Voltage loss, V _{CC} - V _O ⁽⁴⁾ | C _I = C _O = 100-μF tantalum | I _O = 10 mA | Full range | 0.35 | 0.55 | V |
| | | | I _O = 100 mA | | 1.1 | 1.6 | |
| | Output resistance | ΔI _O = 10 mA to 100 mA | See ⁽⁵⁾ | Full range | 10 | 15 | Ω |
| | Oscillator frequency | V _{CC} = 3.5 V to 15 V | Full range | 15 | 25 | 35 | kHz |
| V _{ref} | Reference voltage | I _(REF) = 60 μA | 25°C | 2.35 | 2.5 | 2.65 | V |
| | | | Full range | 2.25 | | 2.75 | |
| | Maximum switch current | | 25°C | | 300 | 4 | mA |
| I _{CC} | Supply current | I _O = 0 | V _{CC} = 3.5 V | Full range | 2.5 | 5 | mA |
| | | | V _{CC} = 15 V | | 3 | 200 | |
| | Supply current in shutdown | V _(FB/SD) = 0 V | Full range | | 100 | | μA |

Abb. A.1: Auszug des Kapitels 6.5 des Datenblattes zum *LT1054* von TEXAS INSTRUMENTS [2].

B Anhang

Listing B.1: Python-Code zur Darstellung der Spannungswerte am Ausgang des *LT1054* bei verschiedenen Kombinationen für die Widerstandswerte R_1, R_2 .

```
1         import matplotlib.pyplot as plt
2         from eseries import find_nearest, E12
3
4         def getU(R_one, R_two):
5             return 1.21 * (1 - (R_two / R_one))
6
7         vals = [22,27,33,39,47,56,68,82,100]
8
9         newvals = []
10        for val in vals:
11            newvals.append(find_nearest(E12, val*((5 / 1.21) - 1)))
12        newvals
13
14        hsize = 10
15        fig, ax = plt.subplots(figsize=(hsize, hsize * (9/16)))
16
17        for val in vals:
18            Uout = []
19            for i, newval in enumerate(newvals):
20                Uout.append(getU(val, newval))
21                if i == len(newvals) - 1:
22                    ax.plot(newvals, Uout, label=(str(val) + "k"))
23
24        ax.axhspan(-4.9, -5.1, color="green", alpha=.1)
25        ax.set_xlim(100, 300)
26        ax.set_title("Kurvenschaar zur Ermittlung passender Widerstandswerte")
27        ax.set_xlabel("$R_2$ / $k\Omega$")
28        ax.set_ylabel("$U_S$ / $V$")
29        ax.set_xticks(newvals)
30        ax.legend()
31        ax.grid()
32        plt.show()
```


Literatur

- [1] jonk. *Forenbeitrag. Why does LTSpice sometimes stop printing midway through a simulation.* URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/350520/why-does-ltspice-sometimes-stop-printing-midway-through-a-simulation> (besucht am 21.06.2021).
- [2] *LT1054 Switched-Capacitor Voltage Converters With Regulators. Datasheet.* Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lt1054.pdf> (besucht am 05.06.2021).