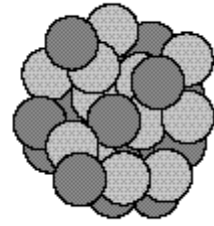




**Praktikum für Fortgeschrittene
Institut für Kernphysik
Technische Universität Darmstadt**



Versuch 5.1 B

Operationsverstärkerschaltungen und Computersimulation elektronischer Schaltungen

Bei diesem Versuch sollen Sie mit den grundlegenden Eigenschaften und Anwendungen von Operationsverstärkern vertraut gemacht werden, und es soll Ihnen ein Einblick in die Technik der Schaltungssimulation mit PSPICE gegeben werden. Im ersten Teil des Versuches sollen mehrere Operationsverstärkerschaltungen aufgebaut und untersucht werden. Im zweiten Teil sollen mit dem PC die Schaltungen simuliert und die Ergebnisse des praktischen Teils mit den Resultaten der Computersimulation verglichen werden.

ANWENDUNGEN: Operationsverstärkerschaltungen werden für vielfältige Aufgaben eingesetzt. Der Name Operationsverstärker stammt aus der Analogrechnertechnik. Die häufigsten Anwendungen für Operationsverstärker sind die Verstärkung und Filterung von Signalen in der Messtechnik, Steuer- und Regelungstechnik und der Unterhaltungselektronik.

Die Technik der Impulsformung mit Pole-Zero-Cancellation wird bei kernphysikalischen Messungen angewendet, wenn Impulse aus Zählern ausgewertet werden (auch in Praktikumsversuchen). Ohne Pole-Zero-Cancellation würde ein Teil der Impulse durch Überlagerungseffekte nicht registriert.

Die Simulation elektronischer Schaltungen am Computer ermöglicht die Erprobung von Schaltungen ohne den zeit- und kostenintensiven Aufbau von Prototypen. Außer der Simulation von elektronischen Schaltungen können durch elektromechanische Analogien mechanische Systeme simuliert werden. Das Programm PSPICE von MicroSim ist die am weitesten verbreitete Simulationssoftware für PCs. Die Demoversion ist auf dem Praktikums-PC in der Kernphysikalischen Bibliothek installiert und kann über Internet, ftp oder

das HRZ bezogen werden. Die Demoversion besitzt Einschränkungen bei der Anzahl der Bauteile und unterstützt nicht alle Analysearten, ist aber trotzdem sehr leistungsfähig und für viele Schaltungen in der Praxis ausreichend.

Vorbereitung

Zur Vorbereitung auf den Versuch sollten Sie sich mit folgenden Themen vertraut machen:

- Kirchhoffsche Gesetze
- Laplace-Transformation, Bodediagramm
- Übertragungsverhalten von passiven Hoch- und Tiefpässen
- ideale und reale Operationsverstärker
- Spannungsfolgerschaltung, invertierender Verstärker
- Übertragungsverhalten von aktiven Filtern
- Pole-Zero-Cancellation

Versuchsdurchführung

1. Praktischer Teil

(a) Aufbau mit OP 1 in nicht-invertierender Beschaltung (vgl. Abb.1):

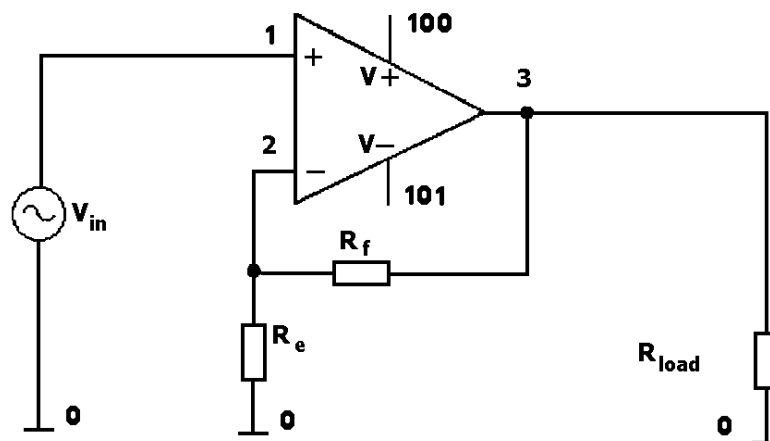


Abb. 1: Operationsverstärker in nicht-invertierender Beschaltung

- Abgleich der Offsetspannung mit geerdeten Eingängen und bei verschiedenen Werten von R_f . Abgleich des Tastkopfes mit dem Rechtecksignal aus dem Calibration-Ausgang des Oszilloskopes (Tastkopfeinstellung 1:10)
- Messung der Übersteuerungsgrenze bei verschiedenen Verstärkungen mit einem Dreiecksignal am Eingang (im folgenden Verlauf ist darauf zu achten, dass der Verstärker nicht übersteuert wird).

- iii. Messung der Bandbreite. Messen Sie die -3 dB-Grenzfrequenz bei verschiedenen Verstärkungen, um daraus das Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt zu berechnen. Verwenden Sie als Eingangssignal eine Sinusspannung. Die Ausgangsspannung soll dabei konstant gehalten werden (ca. $1 V_{\text{eff}}$).
Bauteilwerte: $R_e = 100 \Omega$; $R_f = 910 \Omega$ oder $4,7 \text{ k}\Omega$ oder $9,1 \text{ k}\Omega$

- (b) Aufbau mit OP 1 in invertierender Beschaltung (vgl. Abb. 2):
- Ableich der Offsetspannung mit geerdeten Eingängen und 10-facher Verstärkung
 - Messung der Spannung zwischen dem invertierenden Eingang (virtuelle Erde) und Erde. Verwenden Sie ein Rechtecksignal mit großer Breite als Eingangssignal. Skizzieren Sie das Oszillogramm und bestimmen Sie die Abfallzeit des Signals. Bauteilwerte: $R_f = 10 \text{ k}\Omega$; $R_e = 10 \text{ k}\Omega$ oder $100 \text{ k}\Omega$

- (c) Aufbau mit OP 2 in invertierender Beschaltung. Tief- und Hochpass 1. Ordnung (vgl. Abb. 3 und 4):

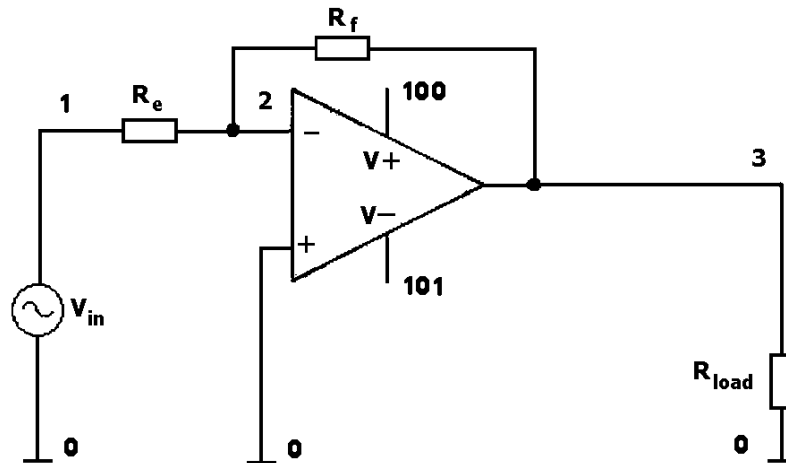


Abb. 2: Operationsverstärker in invertierender Beschaltung

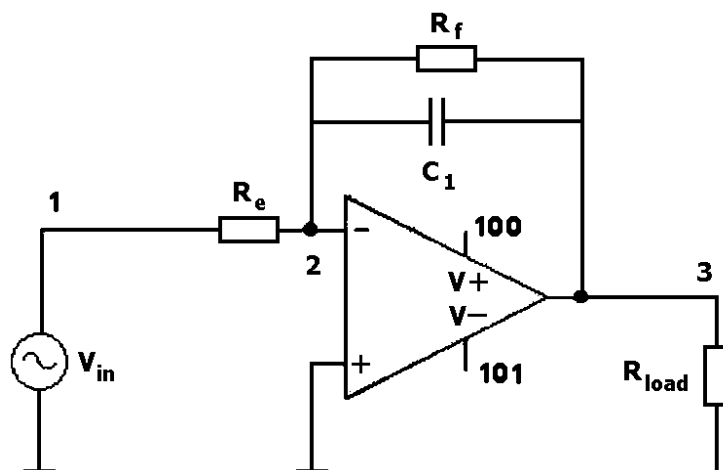


Abb. 3: Tiefpass 1. Ordnung

- Aufbau eines Tiefpasses 1. Ordnung. Verwenden Sie eine Rechteckspannung mit $T \ll \tau_0$ als Eingangssignal. Messen und skizzieren Sie die Sprungantwort. Messen Sie die Ausgangsamplitude bei fünf

verschiedenen Werten für die Eingangsamplitude und zwei verschiedenen Periodendauern T des Eingangssignals.

Bauteilwerte: $R_e = 10 \text{ k}\Omega$; $R_f = 10 \text{ k}\Omega$; $C_1 = 10 \text{ nF}$

- ii. Aufbau eines Hochpasses 1. Ordnung. Verwenden Sie eine Rechteckspannung mit $T \gg \tau_0$ als Eingangssignal. Skizzieren Sie die Sprungantwort. Ermitteln Sie die Grenzfrequenz des Filters.

Bauteilwerte: $R_e = 10 \text{ k}\Omega$; $R_f = 10 \text{ k}\Omega$; $C_1 = 10 \text{ nF}$

(d) Aufbau mit OP 3:

- i. Impulsformung für den Strahlungsdetektor (vgl. Abb. 5 und 6). Messung mit dem Oszilloskop:
- Stellen Sie mit den Signalen aus dem Random-Impulsgenerator das sogenannte „Pile-Up“ auf dem Oszilloskop dar und skizzieren Sie es.
 - Verringern Sie das „Pile-Up“ durch Einsatz eines Hochpasses 1. Ordnung. Skizzieren Sie das jetzt auftretende „Pile-Down“.
 - Impulsformung mit Pole-Zero-Cancellation. Verwenden Sie den Random-Impulsgenerator mit zwei verschiedenen Zeitkonstanten für den exponentiellen Abfall ($\tau = 100 \mu\text{s}$ und $200 \mu\text{s}$) und führen Sie den Abgleich durch, indem Sie den am Potentiometer einstellbaren Bruchteil K der Eingangsamplitude U_e variieren. Verwenden Sie hierzu auf der Steckplatine den Jumper mit der Aufschrift „Messstecker“. Anschließend ist der jeweils eingestellte Wert für K zu bestimmen, indem man den eingangsseitigen Vierpol als Eingangnetzwerk in einem nichtinvertierenden Verstärker (Spannungsfolger) benutzt (vgl. Abb. 6). Dazu wird auf der Steckplatine der Messstecker gegen den Datenstecker ausgetauscht. Verwenden Sie als Eingangssignal eine Rechteckspannung mit großer Zeitkonstante. Skizzieren Sie die Impulsformen.

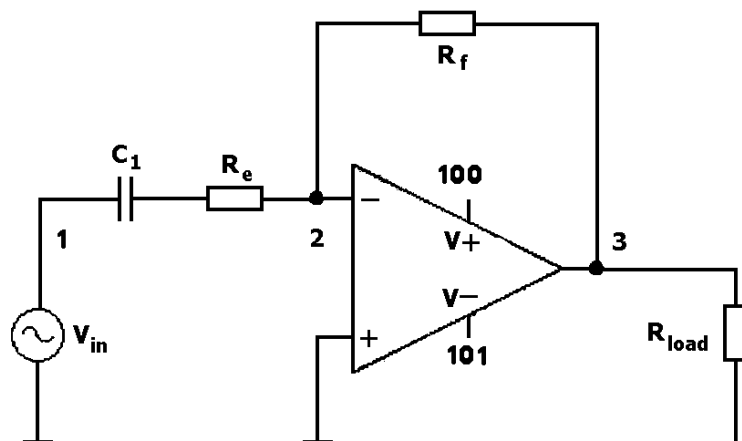


Abb. 4: Hochpass 1. Ordnung

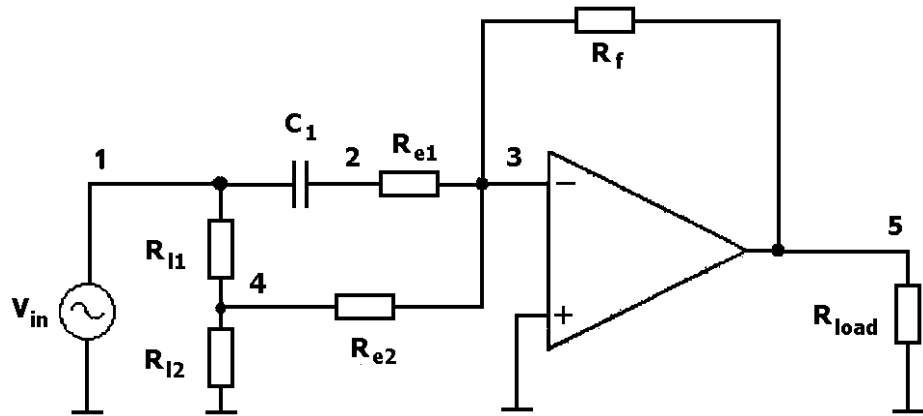


Abb. 5: Pole-Zero-Cancellation: Einstellung von K (Messstecker)

- ii. Aufbau der Tiefpassfilter 2. Ordnung und Untersuchung der Übertragungscharakteristiken mit Sinus- und Rechtecksignal (vgl. Abb. 7 und 8): Zur Verfügung stehen folgende Filter mit fester Verstärkung $V_0=1$: (1) Besselfilter, (2) Butterworthfilter, (3) Tschebyschefffilter mit 3 db Welligkeit, (4) Tiefpassfilter mit variabler Verstärkung. Messen Sie die Ausgangsamplitude als Funktion der Frequenz im Bereich von 100 Hz bis 10 kHz mit sinusförmigem Eingangssignal. Skizzieren Sie den Frequenzgang mit erhöhter Anzahl von Messpunkten im Bereich um die Grenzfrequenz der Filter von 1 kHz. Messen Sie die Sprungantwort der Filter mit einem 100 Hz-Rechtecksignal als Eingangssignal.

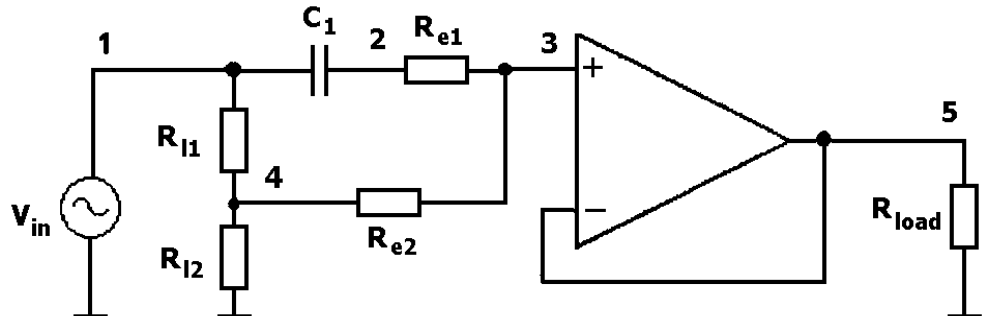


Abb. 6: Pole-Zero-Cancellation: Bestimmung von K (Datenstecker)

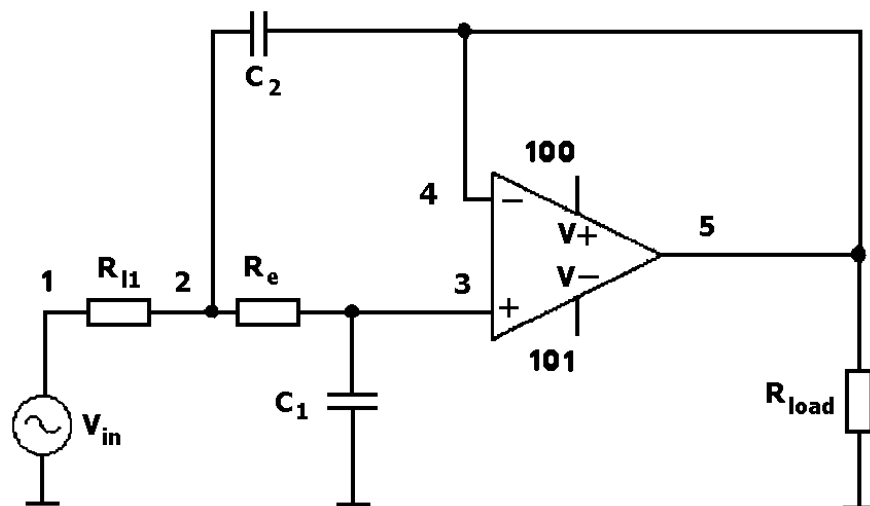


Abb. 7: Tiefpass 2. Ordnung

2. Simulationsteil am PC

- Simulieren Sie den Operationsverstärker in nicht-invertierender Schaltung (vgl. Abb.1). Berechnen Sie aus den Ergebnissen das Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt.
- Übertragungsfunktion und Sprungantwort der Filter 2. Ordnung. Untersuchen Sie den Frequenzgang und die Sprungantwort der Filter. Erstellen Sie Diagramme für den Frequenzgang, Phasengang und die Sprungantwort.
- Vergleichen Sie die Eigenschaften des OP-Modells mit einem idealisierten OP, indem Sie einen Hochpass 1. Ordnung sowohl mit dem Modell des uA741 als auch mit einer spannungsgesteuerten Spannungsquelle (idealer OP) simulieren. Vergleichen Sie den Frequenzgang, die Sprungantwort und das Signal am invertierenden Eingang der beiden Modelle.
- Für Interessierte: Wie kann man mit PSPICE mechanische Systeme simulieren? Wie könnte man z.B. das Verhalten eines Masse-Feder-Systems (Radaufhängung am PKW, Bassreflexlautsprecher) untersuchen?

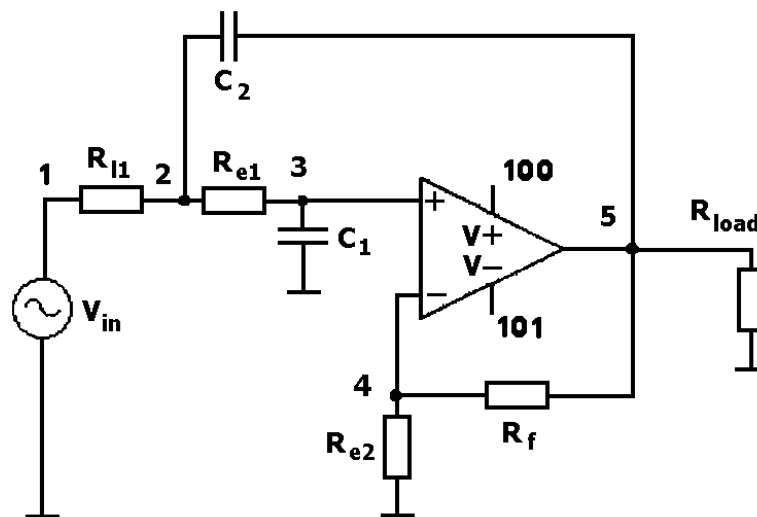


Abb. 8: Tiefpass 2. Ordnung mit variabler Verstärkung

Auswertung der Messungen

Die folgenden Aufgaben zur Auswertung sind nach dem gleichen Schema durchnummeriert wie die Messungen.

1. Praktischer Teil

- Zur Messung an OP 1 in nicht invertierender Beschaltung:
 - Erklären Sie die Auswirkung der äußeren Verstärkung auf den Abgleich der Offsetspannung. Wie genau konnten Sie die Offsetspannung jeweils einstellen?

- ii. Skizzieren Sie das Ausgangssignal im übersteuerten Fall. Welche Beschränkung folgt aus dieser Messung für den folgenden Versuchsablauf?
- iii. Vergleichen Sie die gemessenen Verstärkungs-Bandbreiten-Produkte mit dem theoretischen Wert. Was ist die Ursache für das Abweichen bei der Verstärkung eins? Diskutieren Sie die möglichen Fehlerquellen des Oszilloskops und des Multimeters bei der Messung von Wechselspannungen,

(b) Zur Messung an OP 1 in invertierender Schaltung:

- i. Bereits behandelt.
- ii. Interpretieren Sie die Form des Signals am invertierenden Eingang, leiten Sie das zu erwartende Antwortsignal auf eine Sprungfunktion an der virtuellen Erde theoretisch her und vergleichen Sie sowohl die Kurvenform als auch die Abfallzeit mit dem Experiment.

(c) Zur Messung mit OP 2 in invertierender Beschaltung:

- i. Leiten Sie die Übertragungsfunktion der Schaltung her und zeigen Sie das Integratorverhalten für Rechteckimpulse mit $T \ll \tau$ (Hinweis: Entwickeln Sie das Ausgangssignal in eine Taylorreihe in t). Tragen Sie die gemessenen Ausgangsamplituden über der Eingangsamplitude auf und belegen Sie daran das Integratorverhalten.
- ii. Berechnen Sie die Sprungantwort der Schaltung und zeigen Sie das Differentiatorverhalten auf. Vergleichen Sie die gemessene Grenzfrequenz mit der Theorie.

(d) Zu den Messungen mit OP 3

- i. Messungen zur Impulsformung:
Beschreiben Sie den im Versuch eingeschlagenen Weg, eine für eine Impulzzählung vorteilhafte Formung der Ausgangssignale vorzunehmen („Pile up“, „Pile down“, „Pole-Zero-Cancellation“). Leiten Sie die Übertragungsfunktion für die verwendete Schaltung und die Pole-Zero-Bedingung her. Berechnen Sie, welcher Wert K für die Pole-Zero-Cancellation eingestellt werden muss und vergleichen Sie mit dem Experiment.
- ii. Messungen mit Filtern 2. Ordnung:
Diskutieren Sie die Vor- bzw. Nachteile der verschiedenen Filtertypen (Steilheit, Verzerrung von Signalen, ...)

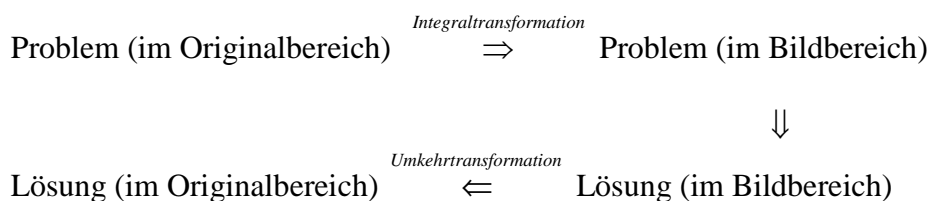
2. Simulationsteil am PC

Vergleichen Sie die Ergebnisse der Simulation mit denen Ihrer Messungen. Wo gibt es Abweichungen von der Praxis und warum? Wodurch ist die Genauigkeit der Simulation begrenzt?

Grundlagen und Anwendung der Laplacetransformation

Allgemeine Bemerkungen:

Integraltransformationen wie die Fouriertransformation, die Laplacetransformation oder die Hilberttransformation stellen wertvolle Hilfsmittel für Ingenieure und Physiker dar. Ihre Bedeutung besteht vor allem darin, dass sie sich häufig vorteilhaft bei der Lösung von mathematischen Aufgaben, insbesondere bei Differentialgleichungsproblemen, verwenden lassen. Hierbei wird das Ausgangsproblem (im Originalbereich) auf ein äquivalentes Problem im Bildbereich abgebildet und dort gelöst. Anschließend bestimmt man die Lösung des ursprünglichen Problems durch „Rücktransformation“. Wir verdeutlichen die Vorgehensweise anhand eines Schemas:



Anwendung der Laplacetransformation in linearen Netzwerken mit Kapazitäten und Induktivitäten:

Wir betrachten jetzt die Übertragung zeitlich veränderlicher Spannungen durch Netzwerke, die neben ohmschen Widerständen auch Kapazitäten und Induktivitäten enthalten sollen. In solchen Netzwerken führt bereits das Anlegen einer Gleichspannung zu einer zeitlich veränderlichen Ausgangsspannung. Die Anwendung der Kirchhoff'schen Sätze auf solche Netzwerke führt auf lineare Differentialgleichungen für Spannungen und Ströme. Transformiert man diese Differentialgleichungen in den Laplace-Raum (s-Raum), so gelten für die transformierten Spannungen und Ströme die Kirchhoff'schen Sätze in ihrer ursprünglichen Form, wenn man den Kapazitäten und Induktivitäten die folgenden komplexen Widerstände (Impedanzen) zuordnet:

- Kapazität C: $Z = 1/sC$
- Induktivität L: $Z = sL$
- Ohmscher Widerstand R: $Z = R$

Mit der Abhängigkeit der Impedanzen von der komplexen Variablen s (Frequenz) hängt auch die Übertragungsfunktion, die den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsspannung im s-Raum beschreibt, von s ab: $U_a(s) = U_e(s) \cdot H(s)$. Im Zeitraum stellt sich die Verknüpfung von Eingangsspannung und Übertragungsfunktion nicht als einfache Multiplikation, sondern als Faltungsintegral dar.

Um die Ausgangsspannung $U_a(t)$ zu erhalten, sind folgende Schritte notwendig:

1. Bestimme $H(s)$ aus den Kirchhoff'schen Sätzen

2. Transformiere die Eingangsspannung in den s-Raum $U_e(t) \Rightarrow U_e(s)$
3. Berechne die Ausgangsspannung $U_a(s) = U_e(s) \cdot H(s)$
4. Transformiere die Ausgangsspannung zurück in den Zeitbereich $U_a(s) \Rightarrow U_a(t)$

Die Transformation und Rücktransformation führt man am bequemsten mit Hilfe einer Korrespondenztabelle durch.

Beispiel: Passiver Hochpass 1. Ordnung

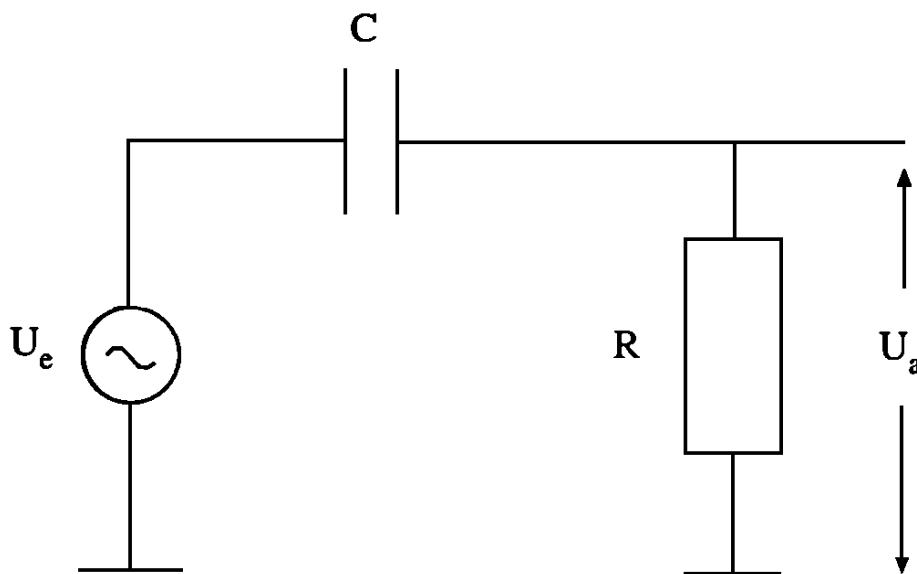


Abb. 1: Passiver Hochpass 1. Ordnung

- Anwendung der Kirchhoff'schen Sätze ergibt:

$$U_a = I \cdot R = \frac{R U_e}{(1/sC) + R} = \frac{U_e \cdot s}{s + 1/RC}. \text{ Mit } RC = \tau_0 \text{ wird } H = \frac{s}{s + 1/\tau_0}$$

- Sprungfunktion als Eingangssignal:

$$U_e(t) = \text{const} (t > 0), \text{ das heißt } U_e(s) = 1/s$$

- Berechnung der Antwortfunktion im s-Raum

$$U_a(s) = U_e(s) \cdot H(s) = 1/s \cdot H(s) = \frac{1}{s + 1/\tau_0}$$

- Rücktransformation:

$$U_a(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right)$$

Tabelle 9.1: Zur Laplacetransformation

$f(t)$	$F(z)$
1	$\frac{1}{z}$
t	$\frac{1}{z^2}$
$t^n, n \in \mathbb{N}$	$\frac{n!}{z^{n+1}}$
$t^a, a > -1$	$\frac{\Gamma(a+1)}{z^{a+1}}$
e^{at}	$\frac{1}{z-a}$
$\delta(t-t_0)$ bzw. $\delta(t)$	e^{-zt_0} bzw. 1
$\ln t$	$-\frac{1}{z}(c + \ln z)$
$\frac{t^{n-1} e^{at}}{(n-1)!}, n \in \mathbb{N}$	$\frac{1}{(z-a)^n}$
$\frac{t^{\beta-1} e^{at}}{\Gamma(\beta)}, \beta > 0$	$\frac{1}{(z-a)^\beta}$
$\sin at$	$\frac{a}{z^2 + a^2}$
$\cos at$	$\frac{z}{z^2 + a^2}$
$e^{bt} \sin at$	$\frac{a}{(z-b)^2 + a^2}$
$e^{bt} \cos at$	$\frac{z-b}{(z-b)^2 + a^2}$
$\sinh at$	$\frac{a}{z^2 - a^2}$
$\cosh at$	$\frac{z}{z^2 - a^2}$

$f(t)$	$F(z)$
$e^{bt} \sinh at$	$\frac{a}{(z-b)^2 - a^2}$
$e^{bt} \cosh at$	$\frac{z-b}{(z-b)^2 - a^2}$
$t \sin at$	$\frac{2az}{(z^2 + a^2)^2}$
$t \cos at$	$\frac{z^2 - a^2}{(z^2 + a^2)^2}$
$f'(t)$	$zF(z) - f(0)$
$f^{(n)}(t), n \in \mathbb{N}$	$z^n F(z) - z^{n-1} f(0) - \dots - f^{(n-1)}(0)$
$\int_0^t f(u) du$	$\frac{F(z)}{z}$
$\int_1^\infty \frac{f(u)}{u} du$	$\frac{1}{z} \int_0^z F(w) dw$
$\int_0^t f_1(u) f_2(t-u) du$	$F_1(z) \cdot F_2(z)$
$(-1)^n t^n f(t), n \in \mathbb{N}$	$F^{(n)}(z)$
$e^{-at} f(t)$	$F(z+a)$
$\frac{1}{a} f\left(\frac{t}{a}\right), a > 0$	$F(az)$
$a f_1(t) + b f_2(t)$	$a F_1(z) + b F_2(z)$
$J_0(at)$	$\frac{1}{\sqrt{z^2 + a^2}}$