

# Elektrotechnisches Versuchspraktikum

Für Bachelor-Studierende der Studiengänge Elektrotechnik (ET, 3. Semester), Elektrotechnik my Track (ET my Track, 5. Semester), Allgemeine Ingenieurwissenschaften (AIW 5. Semester), Engineering Science (5. Semester) und Technomathematik (TM 5. Semester)

Versuch Nr.: 4

Analoge Schaltungen

Ort: Gebäude N, ES 40, Raum N-1077

Allgemeine Informationen unter:

<https://www.tuhh.de/mtec/teaching/e-praktikum>

Stand der Versuchsbeschreibung: 22.10.2022

# Inhaltsverzeichnis

<b>A Zielsetzung</b>	<b>2</b>
<b>B Grundlagen</b>	<b>3</b>
B.1 Frequenzgang . . . . .	3
B.2 Bode-Diagramm . . . . .	5
B.3 Sprungantwort und Zeitkonstante . . . . .	6
B.4 Operationsverstärker . . . . .	7
B.5 Regelkreise . . . . .	8
B.6 Geräte und Versuchsaufbau . . . . .	9
<b>C Versuchsvorbereitung</b>	<b>14</b>
C.1 Frequenzgang und Bode-Diagramm . . . . .	14
C.2 Operationsverstärker . . . . .	15
C.3 Regelkreise . . . . .	16
C.4 Bedienung und Ablesung . . . . .	16
<b>D Versuchsdurchführung</b>	<b>17</b>
D.1 Schaltung RC . . . . .	17
D.2 Erweiterung einer bekannten Schaltung . . . . .	19
D.3 Schaltung RL . . . . .	20
D.4 Analyse einer unbekannt Schaltung . . . . .	21
D.5 Schaltung mit Operationsverstärker . . . . .	22
D.6 Einsatz analoger Schaltungen als Regler . . . . .	25
<b>E Literaturhinweise</b>	<b>26</b>

# A Zielsetzung

Das Ziel des Versuches „Analoge Schaltungen“ ist es, das Frequenz- und Zeitverhalten einfacher elektrischer Bauelemente wie ohmscher Widerstände, Kondensatoren und Spulen, kennenzulernen und ihr Zusammenwirken zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden einige grundlegende Schaltungstypen in Versuchsreihen vermessen und die Ergebnisse dann mit den theoretischen Überlegungen verglichen.

Des Weiteren soll auch der Umgang mit dem Oszilloskop, als einem der wichtigsten Messinstrumente in der Elektrotechnik, geübt werden. Hierbei werden Sie die Möglichkeit haben, eigenständig Messungen durchzuführen und werden die unterschiedlichen Möglichkeiten, die ein modernes Oszilloskop bei der Analyse von Schaltungen bietet kennenlernen und nutzen.

Als zusätzliches Lernziel werden Sie das Verhalten von aktiven Bauelementen am Beispiel des Operationsverstärkers untersuchen. Dabei steht das grundsätzliche Verständnis der Arbeitsweise eines *idealen Operationverstärkers* im Vordergrund.

Ein Einsatzgebiet analoger Schaltungen in der Praxis ist die Realisierung von Regelungen. Im letzten Versuchsteil werden Sie eine Operationsverstärkerschaltung als analogen Regler einsetzen und die Phänomene eines geschlossenen Regelkreises beobachten und beschreiben.

Nach erfolgreicher Teilnahme an diesem Versuch sollten Sie eigenständig in der Lage sein

- analoge Schaltungen aufzubauen (kein Löten erforderlich),
- mit einem Oszilloskop den Aufbau unbekannter Schaltungen zu analysieren,
- einfache Schaltungen zu modifizieren um ein gewünschtes Verhalten zu erreichen,
- die grundlegenden Elemente und Phänomene eines Regelkreises zu beschreiben.

Der Inhalt der Grundlagenvorlesungen (Kapitel 2-3 und 7-10 aus [1] bzw. Kapitel 2-6 aus [2]) wird für die Durchführung des Versuches vorausgesetzt und sollte zur Vorbereitung noch einmal wiederholt werden. Im Kapitel B werden Grundlagen und Begriffe erläutert, die für die Durchführung des Versuches zusätzlich von Bedeutung sind.

Bitte drucken Sie sich diese Anleitung aus - mindestens die Seiten 14-25

Lesen Sie Kapitel B gründlich und nutzen Sie ggf. Literatur aus E.

Bearbeiten Sie **alle** Vorbereitungsaufgaben aus C auf Ihrem Ausdruck.

Bringen Sie diesen Ausdruck incl. Ihrer Lösungen zum Versuchstermin mit.

Wenn Sie sich D schon ansehen, erleichtert Ihnen das die Durchführung.

Und nun: Viel Spaß bei der Vorbereitung und Durchführung des Versuchs!

# B Grundlagen

## B.1 Frequenzgang

Abbildung 1 zeigt ein dynamisches System mit einem Eingangssignal  $U_e(j\omega)$  und dem daraus resultierenden Ausgangssignal  $U_a(j\omega)$ .

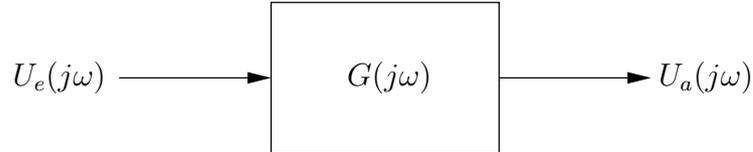


Abbildung 1: Blockschaltbild mit Ein- und Ausgangssignal

Der Frequenzgang  $G(j\omega)$  beschreibt, wie das dynamische System eine sinusförmige Eingangsgröße überträgt. Allgemein gilt, dass ein lineares System bei Anregung durch eine harmonische Schwingung einer bestimmten Frequenz am Eingang – nach Abklingen aller Einschwingvorgänge – mit einer harmonischen Schwingung gleicher Frequenz am Ausgang antwortet. Jedoch wird sich das Ausgangssignal sowohl in der Amplitude als auch in der Phasenlage vom Eingangssignal unterscheiden, wie in Abbildung 2 gezeigt.

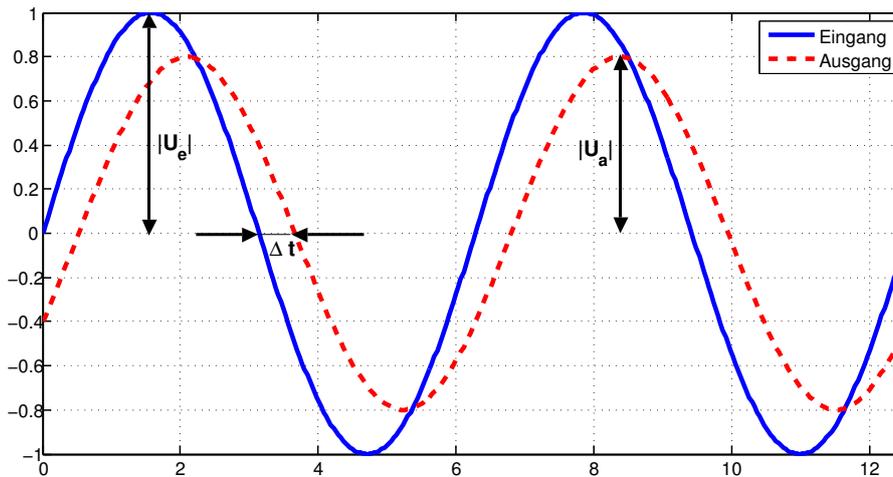


Abbildung 2: Amplitudenverstärkung und Phasenlage

Genau diese Unterschiede werden durch den Frequenzgang

$$G(j\omega) = \frac{U_a(j\omega)}{U_e(j\omega)} \quad (1)$$

beschrieben, der das Verhältnis vom Ausgangssignal  $U_a(j\omega)$  zum Eingangssignal  $U_e(j\omega)$  in Abhängigkeit der komplexen Kreisfrequenz  $j\omega$  darstellt. Durch Umformen der Gleichung (1) kann bei bekanntem Frequenzgang  $G(j\omega)$  des Systems das Ausgangssignal

$$U_a(j\omega) = G(j\omega)U_e(j\omega) \quad (2)$$

für das Eingangssignal  $U_e(j\omega)$  berechnet werden.

Wie jede komplexe Größe lässt sich auch der Frequenzgang

$$G(j\omega) = |G(j\omega)|e^{arg\{G(j\omega)\}} \quad (3)$$

in Betrag

$$|G(j\omega)| = \sqrt{\Re\{G(j\omega)\}^2 + \Im\{G(j\omega)\}^2} \quad (4)$$

und Phase

$$arg\{G(j\omega)\} = \phi(j\omega) = \arctan \frac{\Im\{G(j\omega)\}}{\Re\{G(j\omega)\}} \quad (5)$$

aufspalten.

Obwohl für den Frequenzgang nur das stationäre Verhalten berücksichtigt wird, kann mit Hilfe der *Laplace-Transformation* (die Sie in den folgenden Semestern genauer kennenlernen werden) das Ausgangssignal für beliebige Eingangssignale berechnet werden. Hierbei wird die Frequenz  $j\omega$  durch die komplexe Größe  $s = \delta + j\omega$  ersetzt. Für die folgenden Herleitungen kann man aber stets  $\delta = 0$  annehmen.

Der Frequenzgang  $G(j\omega)$  eines Systems kann näherungsweise experimentell bestimmt werden, indem die Ausgangssignale bei sinusförmigen Eingangssignalen verschiedener Frequenz aufgenommen und die Amplituden und Phasen der Ein- und Ausgangssignale punktweise eingezeichnet werden.

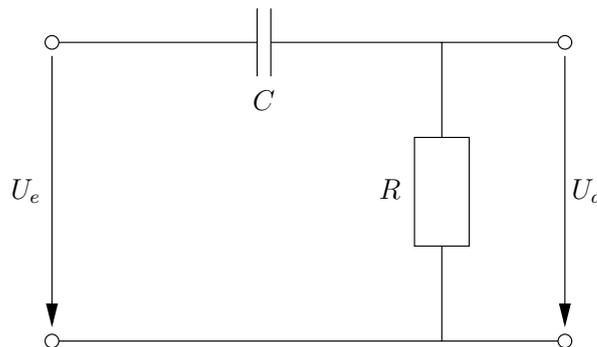


Abbildung 3: RC Schaltung

Als Beispiel betrachten wir die in Abbildung 3 gezeigte Reihenschaltung eines ohmschen Widerstands  $R$  und einer Kapazität  $C$ . Der Frequenzgang kann mit Hilfe eines komplexen Spannungsteilers aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= \frac{U_a(j\omega)}{U_e(j\omega)} = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{j\omega CR}{1 + j\omega CR} = \\ &= \frac{(\omega RC)^2 + j\omega RC}{1 + (\omega RC)^2} = \frac{(\omega RC)^2}{1 + (\omega RC)^2} + j \frac{\omega RC}{1 + (\omega RC)^2}, \end{aligned}$$

daraus folgt für den Betrag

$$|G(j\omega)| = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

und die Phase

$$arg\{G(j\omega)\} = \phi(j\omega) = \arctan \frac{1}{\omega RC}.$$

## B.2 Bode-Diagramm

Sowohl der Betrag  $|G|$  als auch die Phase  $\phi$  ändern sich mit der Kreisfrequenz  $\omega$ , man bezeichnet die funktionalen Zusammenhänge als *Amplitudengang*  $|G(j\omega)|$  und *Phasengang*  $\phi(j\omega)$ . Trägt man den Betrag und die Phase des Frequenzganges in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$  auf, so erhält man das *Frequenzkennliniendiagramm* oder auch *Bode-Diagramm*, [8].

Da sich der für praktische Aufgaben interessante Frequenzbereich über mehrere Zehnerpotenzen erstreckt, werden Betrag und Phase halblogarithmisch über  $\lg \omega$  aufgetragen. Für den Amplitudengang wird der Betrag dabei in Dezibel (dB) umgerechnet, wobei gilt

$$|G|_{dB} = 20 \lg |G| , \quad (6)$$

d.h. einer Verstärkung von 1 entspricht der Wert 0 dB.

Abbildung 4 zeigt das Bode-Diagramm für das in Abbildung 3 dargestellte RC-Glied mit  $R = 10k\Omega$  und  $C = 1\mu F$ . Man erkennt deutlich, dass nur hohe Frequenzen unge-dämpft passieren können, dieses Verhalten heißt *Hochpass*.

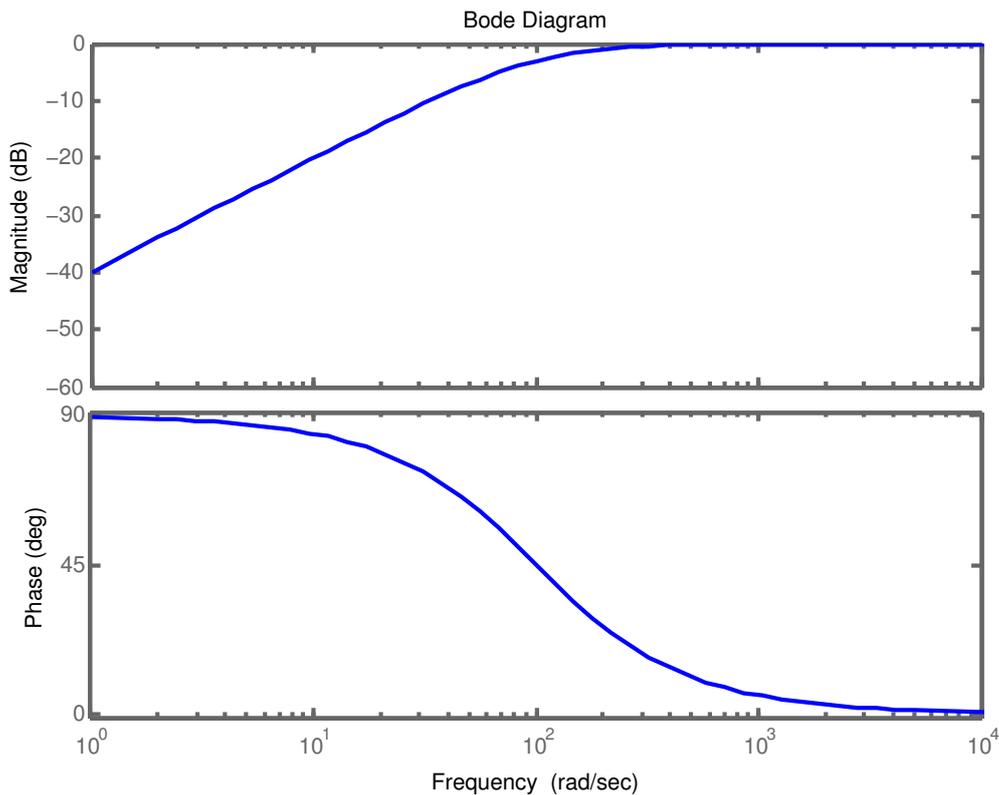


Abbildung 4: Bode-Diagramm der RC-Schaltung

Charakteristisch ist die sog. *Knickfrequenz*, bei der der Amplitudengang seine Steigung ändert, in Abbildung 4 liegt sie bei  $100 \frac{rad}{s}$ . Bei dieser Frequenz liegt die Phase genau in der Mitte der Grenzwerte für sehr große und kleine Frequenzen (im Beispiel  $45^\circ$ ).

### B.3 Sprungantwort und Zeitkonstante

Neben sinusförmigen Eingangssignalen spielen u.a. sprungförmige Eingangssignale eine weitere wichtige Rolle in der Analyse der dynamischen Eigenschaften von Systemen. Das Ausgangssignal wird *Sprungantwort* oder *Übergangsfunktion* genannt, wobei man davon ausgeht, dass die Sprunghöhe am Eingang den Wert „Eins“ hat, evtl. nach einer Normierung auf die jeweilige physikalische Einheit der Eingangsgröße, z.B. Volt [V].

Als Beispiel sei noch einmal die RC-Schaltung aus Abbildung 3 betrachtet: Welchen Verlauf hat die Ausgangsspannung  $U_a(t)$  bei einem sprungförmigen Spannungssignal  $U_e(t)$  am Eingang unter der Annahme, dass der Kondensator zum Zeitpunkt  $t = 0$  ungeladen ist?

Laut der Maschenregel gilt für die Spannungen und deren Ableitungen

$$U_C + U_a - U_e = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{U}_C + \dot{U}_a - \dot{U}_e = 0 .$$

Kombiniert man dies mit den Bauteilgleichung für die Spannungen  $U_R = U_a$  über dem Widerstand und  $U_C(t)$  über dem Kondensator, so erhält man

$$U_a = R i_r = R i_c = R C \dot{U}_c = R C (\dot{U}_e - \dot{U}_a) .$$

Dies ist eine lineare inhomogene Differentialgleichung des Typs

$$a_0 U_a + a_1 \frac{dU_a}{dt} + \dots + a_n \frac{d^n U_a}{dt^n} = b_0 U_b + b_1 \frac{dU_b}{dt} + \dots + b_n \frac{d^n U_b}{dt^n} \quad (7)$$

und der Ordnung  $n = 1$  mit den Koeffizienten  $a_0 = 1$ ,  $a_1 = RC$ ,  $b_0 = 0$ ,  $b_1 = RC$ . Mit dem Ansatz

$$U_a(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \Rightarrow \quad \dot{U}_a(t) = -\frac{U_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ergibt sich für die Sprungfunktion  $U_e(t) = 1$  und  $\dot{U}_e(t) = 0$  als Eingangssignal – unter Vernachlässigung einer  $\delta$ -Funktion der Ableitung an der Sprungstelle  $t = 0$  – durch Einsetzen in die Differentialgleichung  $\tau = RC$  und aus physikalischen Gründen  $U_0 = 1$ . Die Konstante  $\tau = RC$  wird als *Zeitkonstante* des RC-Gliedes bezeichnet. Aus der Formel liest man direkt die folgende wichtige Beziehung ab.

Die Zeitkonstante  $\tau$  ist die Zeit, nach welcher die Ausgangsgröße  $e^{-1} = 37\%$  des Anfangswertes (bzw.  $63\%$  des Endwertes) erreicht.

Schaltungen mit genau einem Energie speichernden Element - wie einer Spule oder einem Kondensator - sind gekennzeichnet durch **eine** Zeitkonstante. Das Bodediagramm solcher Schaltungen hat ebenfalls genau **eine** Knickfrequenz, die bei dem Kehrwert der Zeitkonstante liegt, wobei die Richtung des Knicks durch den Aufbau und die Bauelemente der Schaltung bestimmt sind.

$$\text{Zeitkonstante} = \frac{1}{\text{Knickfrequenz}}$$

Schaltungen mit mehr als einem Energiespeicher zeigen Sprungantworten, die sich mathematisch als Summe von (evtl. komplexen) Exponentialfunktionen beschreiben lassen. Es zeigt sich, dass im Bodediagramm ebenfalls mehrere Knickfrequenzen auftreten, wobei auch i.allg. diese Kreisfrequenzen Kehrwerte der Zeitkonstanten der Exponentialfunktionen sind.

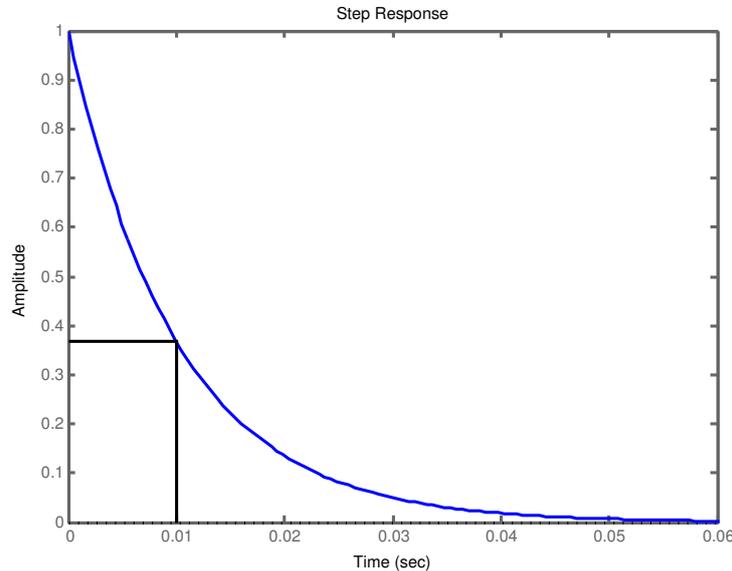


Abbildung 5: Sprungantwort des RC-Gliedes

In Abbildung 5 ist die Sprungantwort der untersuchten RC-Schaltung mit  $R = 10k\Omega$  und  $C = 1\mu F$  dargestellt. Man kann die Zeitkonstante  $\tau = 10ms$  ablesen, da die Knickfrequenz in Abbildung 4 bei  $100 \text{ rad/s}$  lag.

## B.4 Operationsverstärker

Operationsverstärker sind *aktive* Bauelemente, die eine Versorgungsspannung benötigen. Abbildung 6 zeigt das Schaltbild eines Operationsverstärkers, wobei folgende ideale Bedingungen vorausgesetzt werden, [1, 2]:

- unendlich große Spannungsverstärkung,
- unendlich hoher Eingangswiderstand,
- kein Eingangsstrom,
- Ausgangswiderstand gleich Null (Ausgang kann beliebig hohen Strom liefern).

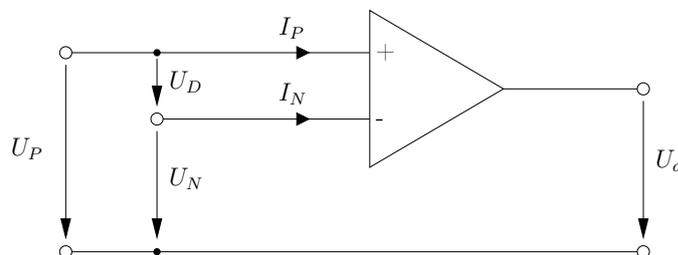


Abbildung 6: Unbeschalteter Operationsverstärker

Für Spannung und Ströme am rückgekoppelten Operationsverstärker (vgl. Abb. 18) kann  $U_D = 0$ ,  $I_P = 0$  und  $I_N = 0$  angenommen werden.

## B.5 Regelkreise

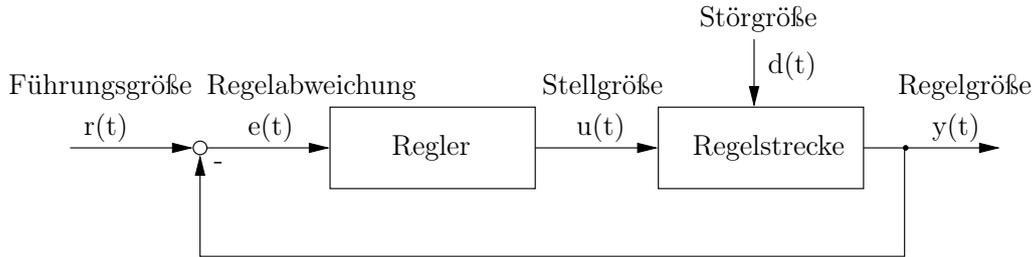


Abbildung 7: Blockschaltbild eines einschleifigen Regelkreises

Abbildung 7 zeigt einen *einschleifigen Regelkreis*. Gegeben ist eine *Regelstrecke* mit einer von außen beeinflussbaren *Stellgröße*, einer messbaren *Regelgröße* und einer i.allg. nicht messbaren *Störgröße*.

Das Ziel der Regelung ist typischerweise, den Ist-Wert, die sog. *Regelgröße* (z.B. eine Temperatur, ein Füllstand, ein Druck, etc.) auf einem vorgegebenen Wert zu halten oder - allgemeiner - sie zeitlich so zu verändern, wie es durch den Soll-Wert, die sog. *Führungsgröße* vorgegeben wird. Gleichzeitig soll die Wirkung äußerer Störungen unterdrückt werden. Um zu erreichen, dass die *Regelgröße* der *Führungsgröße* gleicht, wird die sog. *Stellgröße* (z.B. der Strom einer Elektroheizung) verwendet. Diese wird im Regler aus der *Regelabweichung* (Differenz zwischen Führungs- und *Regelgröße*) bestimmt.

Der Regler bestimmt aus der *Regelabweichung* die *Stellgröße*, damit die *Regelgröße* der *Führungsgröße* unabhängig von der *Störgröße* folgt

Ein alltägliches Beispiel ist der Geschwindigkeitsregler (Tempomat) eines Fahrzeugs (*Regelstrecke*). Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird neben der Kraftstoffzufuhr (*Stellgröße*) u.a. auch von der Fahrbahnsteigung und den Windverhältnissen (*Störgrößen*) beeinflusst. Der Regler hat die Aufgabe, die Kraftstoffzufuhr so zu bestimmen, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit (*Regelgröße*) der eingestellten Sollgeschwindigkeit (*Führungsgröße*) entspricht, egal ob das Fahrzeug bergauf, bergab bzw. gegen oder mit dem Wind fährt.

In modernen technischen Systemen (Fahrzeuge, Flugzeuge, Roboter, verfahrenstechnische Anlagen, etc.) liegen alle Stell-, Regel- und Führungsgrößen meist als elektrische Signale vor - d.h. die erforderlichen Regler haben sowohl elektrische Ausgangs- als auch Eingangssignale, die durch einen analogen Regler verbunden werden können.

Allerdings haben analoge Schaltungen den Nachteil, dass die Struktur durch Ihre Komponenten und Verdrahtung vorgegeben ist. Daher werden Regler heute oft mit digitalen Schaltungen realisiert, deren innere Struktur leichter zu ändern ist. Allerdings haben digitale Regler den Nachteil, dass Zeitverzögerungen durch die Taktung hervorgerufen werden. Je größer diese Verzögerungen sind, desto schwieriger ist es, einen Regler zu finden mit dem ein gutes Verhalten des Regelkreises eingestellt werden kann.

## B.6 Geräte und Versuchsaufbau

### Oszilloskop

Ein Oszilloskop dient zur grafischen Darstellung des zeitlichen Verlaufs von elektrischen Signalen. Anhand des Kurvenverlaufs ist es möglich, charakteristische Größen der zu untersuchenden Schaltung zu messen. Für die Versuchsdurchführung steht das in Abbildung 8 gezeigte digitale Zweikanal-Speicheroszilloskop TDS2002b der Firma Tektronix zur Verfügung.

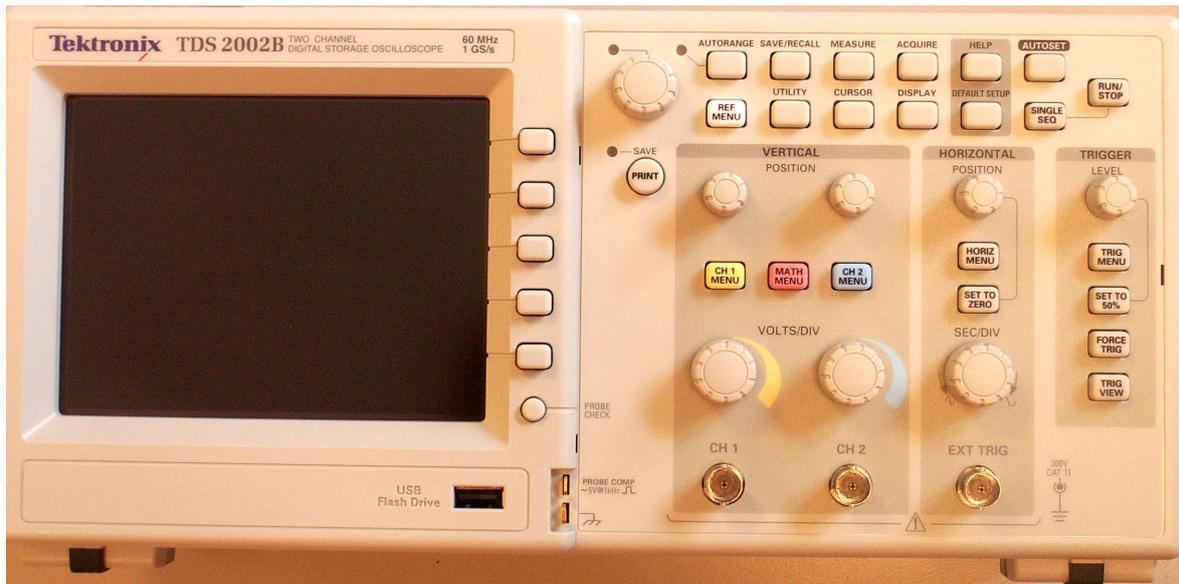


Abbildung 8: Frontansicht des Oszilloskops

Ein Oszilloskop besteht aus vier grundlegenden Funktionsblöcken: dem Vertikalsystem, dem Horizontalsystem, dem Trigger-System und dem Display-System. Auf der Frontplatte des Oszilloskops sind diese Systeme voneinander getrennt angeordnet.

Die Vertikal-Bedienelemente dienen zur Positionierung und Skalierung des Signals entlang der vertikalen Achse. Die Einstellung „Volts/Div“ ändert dabei die Skalierung des Signals auf dem Bildschirm, wohingegen sich mit Hilfe der Einstellung „Position“ das Signal nach oben oder unten auf dem Bildschirm verschieben lässt.

Für jeden Eingangskanal gibt es ein eigenes Vertikal-System. Alle weiteren Einstellmöglichkeiten der Vertikal-Einheit werden für die Durchführung des Versuches nicht benötigt. Beim Aufbau der Messschaltungen ist es wichtig zu berücksichtigen, dass die beiden Eingangskanäle des Oszilloskops nur jeweils das Messen der Spannung gegenüber der gemeinsamen Masse ermöglichen, nicht jedoch der Spannung zwischen beiden Kanälen.

Die Horizontal-Bedienelemente dienen zur Positionierung und Skalierung des Signals entlang der horizontalen Achse. Die Einstellung „Position“ verschiebt das Signal nach links und rechts auf dem Bildschirm. Die Einstellung „Sec/Div“ dient zur Auswahl der Rate, mit der das Signal über den Schirm geführt wird. Es gibt nur ein Horizontal-System für beide Eingangskanäle.

Die Trigger-Funktion dient zur stabilen Darstellung von sich wiederholenden Eingangssignalen. Sie sorgt dafür, dass immer der gleiche Teil des Signals auf dem Bildschirm abgebildet wird. Die wichtigsten Einstellungen sind die Trigger-Flanke und der Trigger-Level. Sie geben an, ob das Signal bei steigendem oder fallendem Verlauf getriggert wird und bei welchem Wert dies geschieht.

Das Display dient zur Anzeige des zu messenden Signals. Es ist mit einem Raster versehen, dessen Skalenteilung in Volt-pro-Division für die vertikale Achse bzw. Sekunde-pro-Division für die horizontale Achse angezeigt wird. Die aktuelle Skalenteilung ist auf dem Bildschirm angegeben.

Für den Versuch sind außerdem zwei weitere Funktionen von besonderer Bedeutung.

Die Funktion „Math Menu“ erlaubt es dem Nutzer, verschiedene mathematische Operationen mit den beiden Eingangssignalen durchzuführen. Zu diesen gehören Summen-, Differenz- und Produktbildung, sowie verschiedene Arten der Fouriertransformation. Das so generierte Signal wird im Display in rot als dritte Quelle „MATH“ zusätzlich zu „CH1“ und „CH2“ angezeigt. Das „Math Menu“ ist hilfreich, um Signale zu erhalten, die sich in der Schaltung selbst nicht messen lassen.

Die zweite Funktion ist die „Cursor“-Option. Mit dieser lassen sich zwei Cursor in den Dimensionen Zeit (vertikal) oder Amplitude (horizontal) erzeugen, die je einem der Eingänge (CH1, CH2 oder MATH) zugeordnet werden können. Die Position der Cursor lässt sich mit dem Mehrzweckrad verstellen. Am rechten Displayrand werden dann verschiedene Informationen, wie der zeitliche Abstand der Cursor, angezeigt. Die Cursor helfen z.B. bei der Berechnung der Zeitkonstante einer Schaltung.



Abbildung 9: Frontblende des Funktionsgenerators

## Funktionsgenerator

Funktionsgeneratoren dienen zur Erzeugung elektrischer Steuersignale, wie beispielsweise Sinus-, Rechteck- oder Sägezahnsignalen. Zur Durchführung des Versuchs werden

Sie einen DDS-Funktionsgenerator vom Typ P4025 der Firma Peaktech nutzen. In Abbildung 9 ist die Frontblende des Funktionsgenerators gezeigt.

Die Bedienung erfolgt über die Drehknöpfe. Dabei wählen Sie zunächst die gewünschte Signalform und stellen dann mittels eines Drehknopfs die Amplitude und Frequenz der Schwingung ein. Alternativ drücken Sie zur Einstellung der Frequenz bzw. Amplitude den entsprechenden Knopf mit der Aufschrift „Freq“ oder „Ampl“, stellen dann über den Ziffernblock den gewünschten Wert ein und bestätigen mit dem Druck der „Dreiecksignal“-Taste, die die Überschrift „V/s Hz“ trägt. Sprungantworten können mit Hilfe von Rechtecksignalen aufgenommen werden, wobei auf die Einstellung einer ausreichend kleinen Frequenz zu achten ist, damit der Endwert vor dem nächsten Sprung erreicht wird.

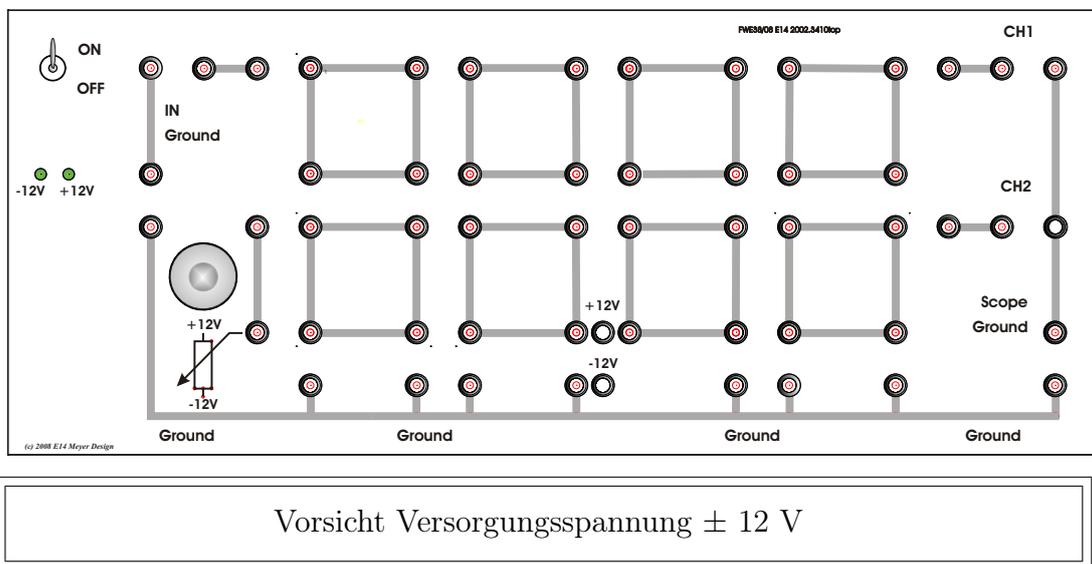


Abbildung 10: Schema Klemmbrett

## Klemmbrett

Alle Schaltungen, die Sie untersuchen werden, müssen vor Beginn der Messung auf einem Klemmbrett mit Hilfe von steckbaren Bauelementen aufgebaut und ordnungsgemäß angeschlossen werden. Zu jeder Schaltung finden Sie in der Aufgabenstellung ein Schaltbild. Abbildung 10 zeigt das Schema des Klemmbretts mit der Versorgungsspannung für den Operationsverstärkerbaustein. Die Anschlüsse des Klemmbretts sind entsprechend der sichtbaren Leiterbahnen untereinander elektrisch verbunden, ansonsten aber isoliert. Bei eingeschaltetem Klemmbrett liegt an den 12V-Anschlüssen eine Spannung von +12V bzw. -12V gegenüber „Ground“ an. Am Potentiometer-Anschluss kann über den Drehknopf eine Spannung von -12V bis +12V eingestellt werden. Die Abschnitte „IN Ground“ und „Scope Ground“ müssen i.d.R. mit „Ground“ verbunden werden.

In Abbildung 11 ist beispielhaft der Aufbau einer simplen Schaltung mit angeschlossenem Funktionsgenerator und Oszilloskop zu sehen. Die „Grounds“ sind kurzgeschlossen, die Versorgungsspannung des Klemmbretts ist ausgeschaltet, da kein Operationsverstärker verwendet wird. Das Oszilloskop misst die Spannung über der gesamten Schaltung (rotes Kabel, gelber Graph) und die Spannung über der Reihenschaltungen aus Kondensator und Spule (schwarzes Kabel, blauer Graph). Der rote Graph in der Mitte des Displays zeigt die Differenz der beiden gemessenen Spannungen, also die Spannung über dem Widerstand.

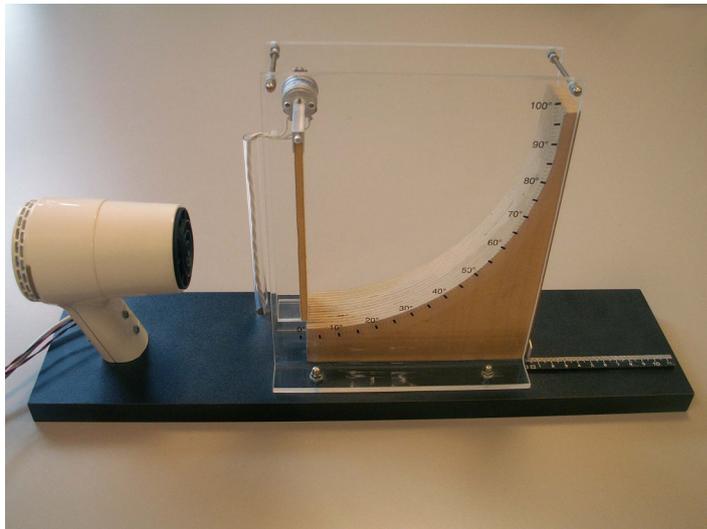


Abbildung 11: Aufbau einer Schaltung auf dem Klemmbrett

## Regelstrecke

Mit der von Ihnen gemäß Kap. B.5 aufgebauten analogen Schaltung werden Sie eines der in Abb. 12 gezeigten Systeme regeln. Im Aufbau aus Abb. 12a ist es das Ziel, die Auslenkung der Platte zu regeln. Der Föhn erzeugt einen Luftstrom, der eine Platte auslenkt. Die Platte bewegt ein Potentiometer, sodass die Amplitude der daran gemessenen Spannung proportional zum Auslenkungswinkel der Platte ist. Der Luftstrom des Föhns kann durch eine Eingangsspannung  $U_{\text{Föhn}}$  variiert werden. Durch Einschieben des Holzkeils kann eine Störung erzeugt werden.

Bei der zweiten Regelstrecke soll der Füllstand der Plexiglasröhre geregelt werden. Die ansteuerbare Pumpe füllt die Röhre mit Wasser, welches durch ein einstellbares Ventil in den Tank zurückfließt. Der Wasserstand wird von einem Füllstandsmesser aufgenommen, der ähnlich dem Potentiometer beim Föhn ein elektrisches Signal abgibt, welches proportional zum Wasserpegel ist.



(a) Föhn



(b) Füllstandsregelung

Abbildung 12: Regelstrecken

## C Versuchsvorbereitung

### C.1 Frequenzgang und Bode-Diagramm

- a) Bestimmen und zeichnen Sie für die in Abbildung 14 auf Seite 17 gezeigte Schaltung mit  $R_1 = 100\Omega$  und  $C_1 = 10\mu F$  die qualitativen Verläufe der Amplitudengänge

$$|G_R(\omega)| = \left| \frac{U_R(\omega)}{U_e(\omega)} \right| \quad \text{und} \quad |G_C(\omega)| = \left| \frac{U_C(\omega)}{U_e(\omega)} \right| \quad (8)$$

sowie der entsprechenden Phasengänge in unterschiedlichen Farben in das Diagramm 13 ein.

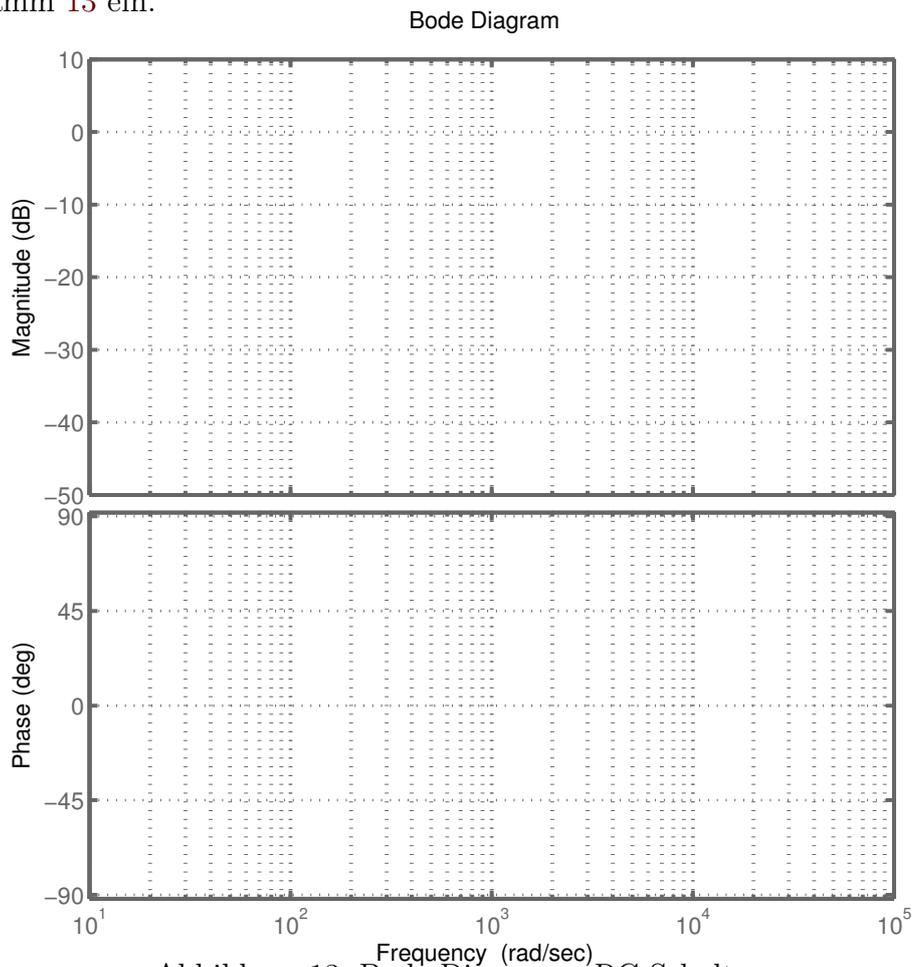


Abbildung 13: Bode-Diagramm RC Schaltung

- b) Leiten Sie eine Differentialgleichung der Form (7) für das in Abbildung 16 auf Seite 20 gezeigte Netzwerk mit  $L_1 = 66mH$  und  $R_2 = 200\Omega$  ab und berechnen Sie die Zeitkonstante. Tragen Sie Ihre errechneten Werte in die Tabelle ein.

$\tau$	$a_0$	$a_1$	$b_0$	$b_1$

## C.2 Operationsverstärker

- a) Wie groß ist die Verstärkung  $v$  der in Abbildung 18 gezeigten Schaltung in Abhängigkeit der Widerstände  $R_4$  und  $R_5$  ?

$v =$

- b) Berechnen Sie das Ausgangssignal  $U_a(t)$  in Abhängigkeit des Eingangssignals  $U_e(t)$  für die in Abbildung 19 gezeigte Schaltung. Nehmen Sie dazu an, dass der Widerstand  $R_8$  nicht eingebaut ist.

### C.3 Regelkreise

- a) Beantworten Sie die folgenden zwei Fragen unter der Annahme, dass die Regelgröße und Führungsgröße im Moment gleich groß sind ( $r = y$ ).

<p>Wie groß ist die Regelabweichung <math>e</math>?</p> <p><input type="checkbox"/> <math>e = 0</math></p> <p><input type="checkbox"/> <math>e = 2u</math></p> <p><input type="checkbox"/> <math>e = \infty</math></p>	<p>Welche Stellgröße <math>u</math> ergibt sich?</p> <p><input type="checkbox"/> <math>u = 0</math></p> <p><input type="checkbox"/> <math>u = y</math></p> <p><input type="checkbox"/> kommt auf den Regler an</p>
--	--

- b) Welche Regelgröße, Führungsgröße und Stellgröße hat das in Abbildung 12 gezeigte Experiment *Föhn*?

Regelgröße	Führungsgröße	Stellgröße

### C.4 Bedienung und Ablesung

- a) Wie können Sie aus der am Oszilloskop gemessenen zeitlichen Verschiebung  $\Delta t$  zweier Signale mit gleicher Periodendauer  $T$  die Phasenverschiebung  $\phi$  bestimmen?

$\phi =$

- b) Was ändern Sie, wenn Sie als Messsignal zur Bestimmung von Zeitkonstanten auf dem Oszilloskop ein Rechtecksignal ohne Abklingen sehen?

- Frequenz des Signalgenerators größer
- Frequenz des Signalgenerators kleiner
- Horizontalfrequenz des Oszilloskops größer
- Horizontalfrequenz des Oszilloskops kleiner
- die Schaltung

Die Lösungen der Vorbereitungsaufgaben werden sowohl für das Kolloquium als auch für die Versuchsdurchführung benötigt.

## D Versuchsdurchführung

Jede Schaltung vor dem Einschalten vom Tutor überprüfen lassen,  
damit keine empfindlichen Bauteile zerstört werden!

### D.1 Schaltung RC

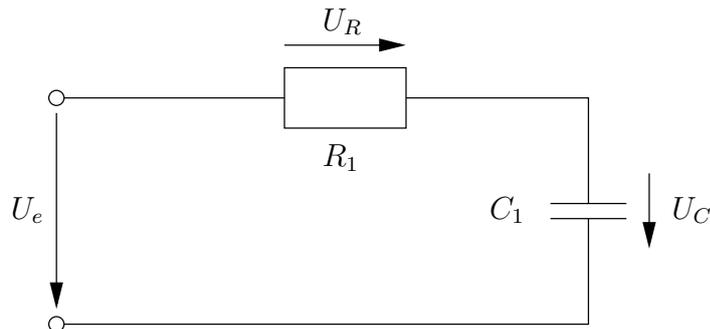


Abbildung 14: RC Schaltplan

- Bauen Sie die in Abbildung 14 gezeigte Schaltung mit  $R_1 = 10k\Omega$  und  $C_1$  auf dem Klemmbrett auf.
- Legen Sie mit Hilfe des Funktionsgenerators eine sinusförmige Spannung mit dem Spitze-Spitze-Wert  $U_{SS} = 5V$  an das Netzwerk. Messen Sie am Oszilloskop im Frequenzbereich von  $10Hz$  bis  $10kHz$  die Spannungen  $U_R$  und  $U_C$  und tragen Sie die absoluten Amplituden und die daraus berechneten dB-Werte der Amplitudenverstärkung in Tabelle 1 ein. Sollte  $U_e$  vom eingestellten Wert abweichen, steht Ihnen die entsprechende Zeile zur Verfügung.

$\omega$	60	100	300	600	1000	3000	6000	10000	30000	60000	rad/s
$f$											Hz
$U_e$											V
$U_C$											V
$U_R$											V
$U_C/U_e$											dB
$U_R/U_e$											dB

Tabelle 1: Amplitudengang RC Schaltung

- Zeichnen Sie Ihre bei den Frequenzen  $f$  gemessenen Werte  $|G_R(\omega)| = \left| \frac{U_R(\omega)}{U_e(\omega)} \right|$  und  $|G_C(\omega)| = \left| \frac{U_C(\omega)}{U_e(\omega)} \right|$  in das Diagramm 13 der Vorbereitungsaufgabe ein. Achten Sie darauf, dass dort auf der Abszisse die Kreisfrequenz  $\omega$  aufgetragen ist. Vergleichen Sie das Ergebnis.

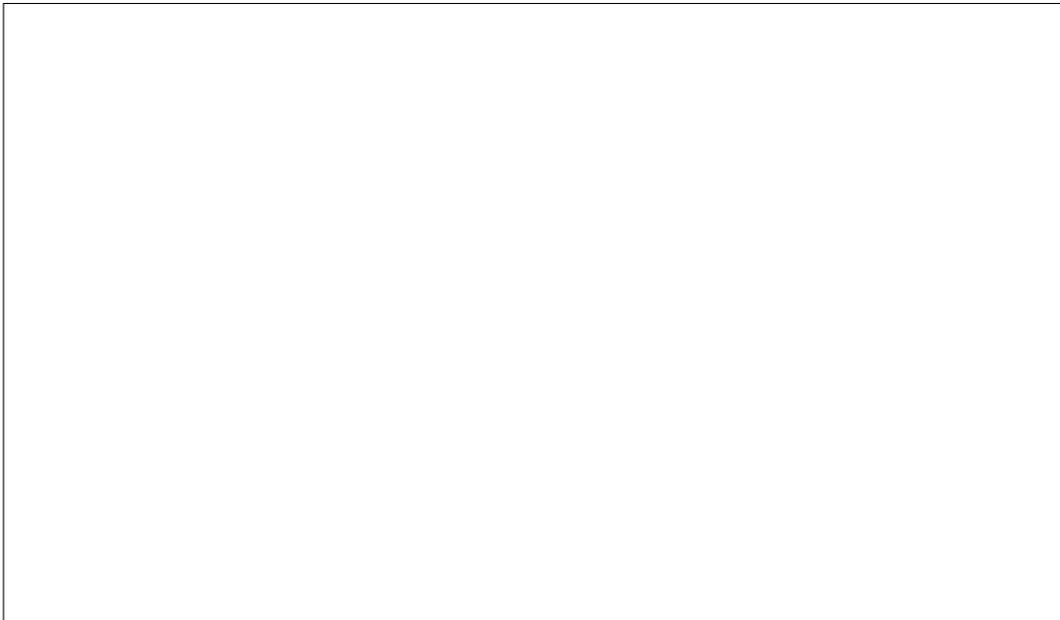
- d) Bestimmen Sie die Grenzfrequenz  $f_g$  bei der gilt:  $U_R = U_C$ .  
(Hinweis: Es gilt  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ )

$$f_g =$$

Berechnen Sie anschließend den Wert der Kapazität  $C_1$  aus der Grenzfrequenz.

$$C_1 =$$

- e) Zeichnen Sie die zu den Frequenzen  $f_1 = 50\text{Hz}$ ,  $f_2 = 3\text{kHz}$  und  $f_g$  gehörigen Zeigerdiagramme der Spannungen. Benutzen Sie  $U_e$  als Bezugszeiger. Zeichnen Sie die Phasenlagen ebenfalls in das Diagramm 13 ein.



## D.2 Erweiterung einer bekannten Schaltung

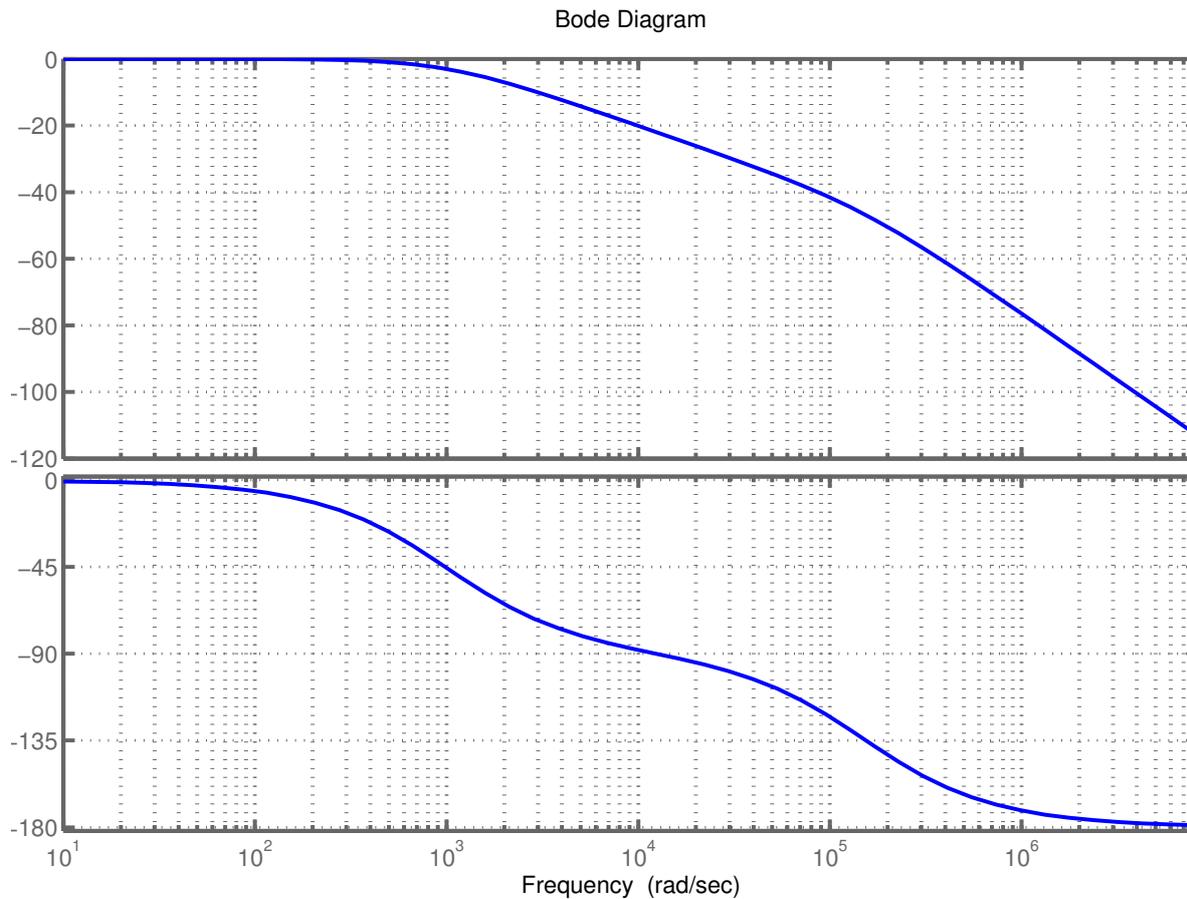


Abbildung 15: Schaltungserweiterung

- a) Wie muß die Schaltung aus Aufgabe D.1 mit der Spule  $L_1 = 66mH$  erweitert werden, um den in Abbildung 15 gezeigten Frequenzgang zu erhalten, wenn die Ausgangsspannung  $U_a$ , soweit nicht anders angegeben über dem Kondensator  $U_a = U_c$  abgegriffen wird?
- Spule  $L_1$  parallel zum Kondensator
  - Spule  $L_1$  in Reihe zum Kondensator ( $U_a$  über  $L_1$  und  $C_1$  abgegriffen)
  - Spule  $L_1$  parallel zum Widerstand
  - Spule  $L_1$  in Reihe zum Widerstand
- b) Überprüfen Sie ihre Vermutung, indem Sie die Schaltung aufbauen und den Amplitudengang und/oder Phasengang bei einigen sinnvollen Frequenzen  $f$  messen.
- c) Erläutern Sie, wofür ein solcher Frequenzgang sinnvoll genutzt werden kann.

### D.3 Schaltung RL

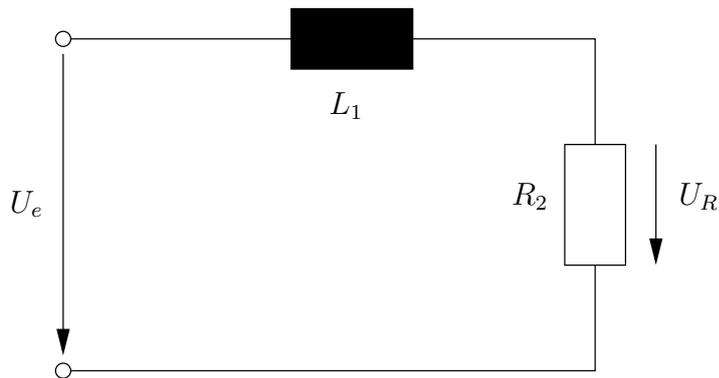


Abbildung 16: RL-Schaltung

- Bauen Sie die in Abbildung 16 gezeigte Schaltung mit  $L_1 = 66\text{mH}$  und  $R_2 = 200\Omega$  auf.
- Legen Sie mit Hilfe des Funktionsgenerators eine Rechteckspannung mit dem Spitze-Spitze-Wert  $U = 5\text{V}$  an das Netzwerk. Beobachten Sie den Verlauf der Spannung  $U_R$  und bestimmen Sie den Wert der Zeitkonstante  $\tau$ .

$\tau =$

Erklären Sie mögliche Abweichungen von der in Vorbereitungsaufgabe 2 berechneten Zeitkonstante. Tipp: Überlegen Sie, wodurch ein Unterschied zwischen der als ideal angenommenen und der realen Spule entsteht!

## D.4 Analyse einer unbekanntnen Schaltung

- a) Nutzen Sie die bisher vorgestellten Methoden zur Untersuchung des Frequenz- und Zeitverhaltens von Netzwerken um qualitativ den inneren Aufbau der Ihnen zur Verfügung gestellten Schaltung in der *Black-Box* zu bestimmen. Kreuzen Sie die richtige Schaltung an.

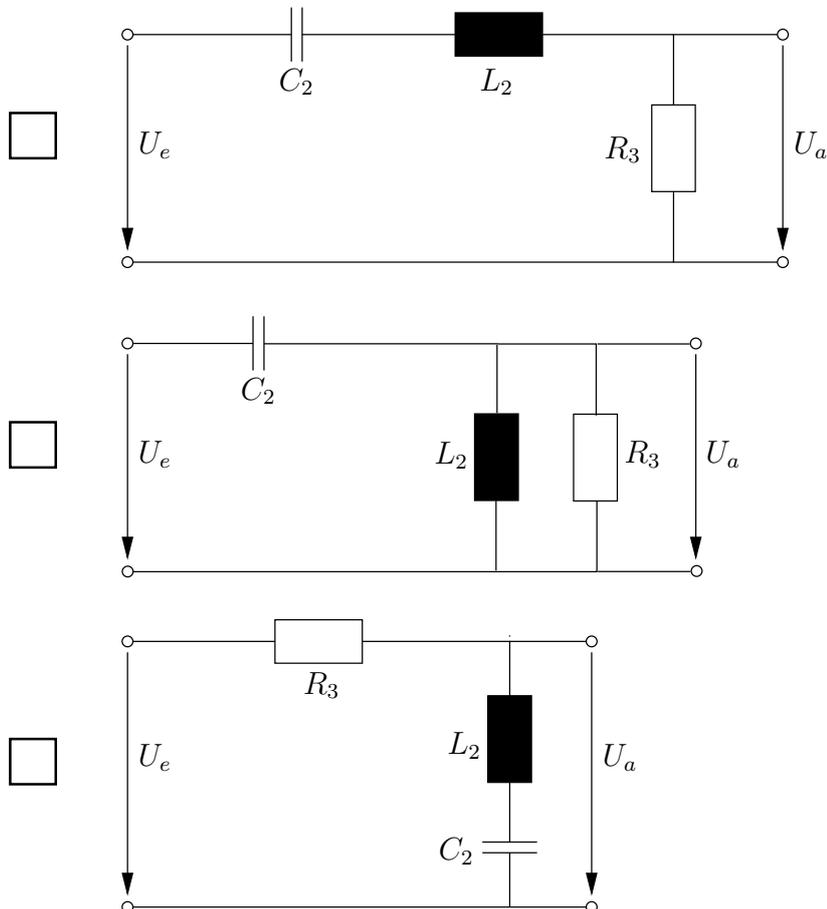


Abbildung 17: Black Box Schaltungen

- b) Überlegen Sie sich, wie Sie analytisch den Widerstand  $R_3$  und die Kapazität  $C_2$  bestimmen ( $L_2 = 33mH$ ). Überprüfen Sie anschließend ob Ihre Überlegungen mit dem Versuch übereinstimmen, in dem Sie die Schaltung auf dem Klemmbrett nachbauen und die beiden Ausgangssignale am Oszilloskop miteinander vergleichen.

- $R_3 = 10k\Omega, C_2 = 10nF$
- $R_3 = 1k\Omega, C_2 = 10nF$
- $R_3 = 200\Omega, C_2 = 10nF$
- $R_3 = 10k\Omega, C_2 = 100nF$
- $R_3 = 1k\Omega, C_2 = 100nF$
- $R_3 = 200\Omega, C_2 = 100nF$



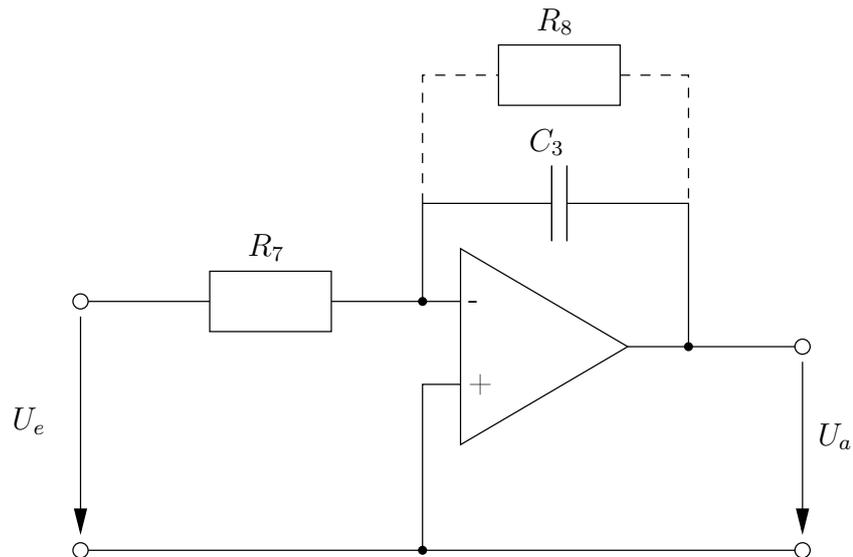
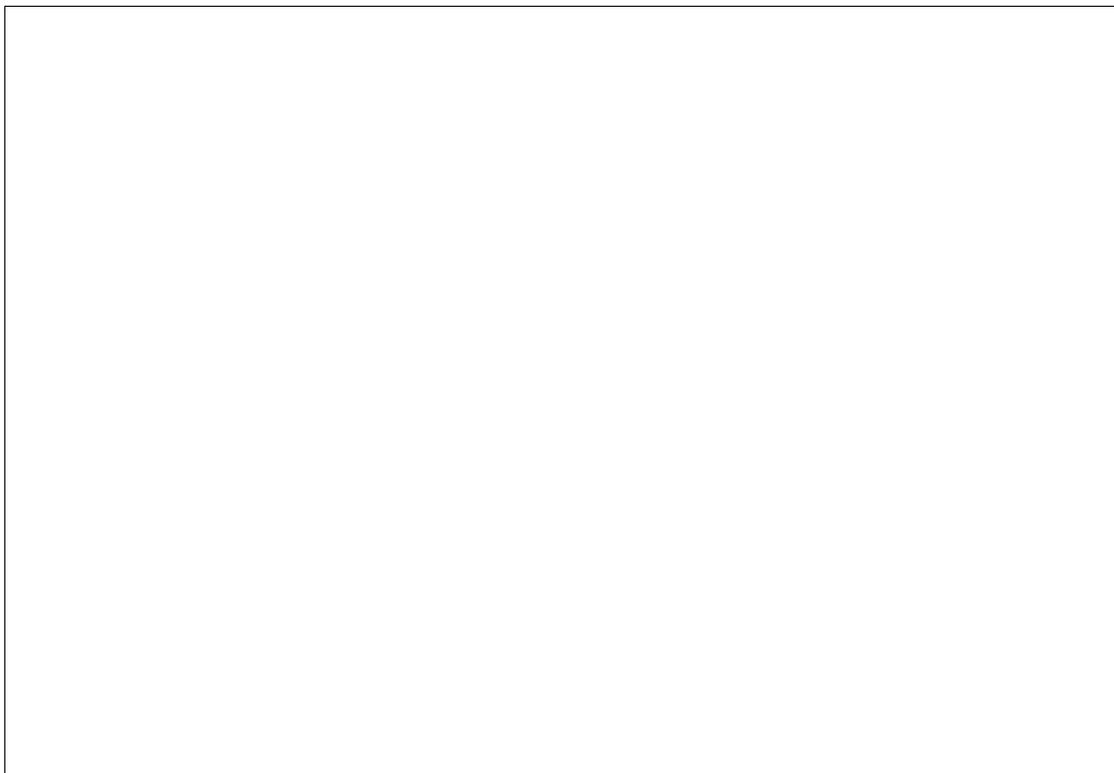


Abbildung 19: Beschlerteter Operationsverstärker

- c) Bauen Sie nun die Schaltung gemäß Abbildung 19 ohne  $R_8$  mit  $R_7 = 10k\Omega$  und  $C_3 = 1\mu F$  auf. Legen Sie mit Hilfe des Funktionsgenerators eine Rechteckspannung mit dem Spitze-Spitze-Wert  $U = 5V$  und der Frequenz  $f = 5Hz$  an die Schaltung. Beobachten und beschreiben Sie die Ausgangsspannung  $U_a$ :



- d) Ergänzen Sie nun Ihre Schaltung um den Widerstand  $R_8 = 10k\Omega$ . Legen Sie mit Hilfe des Funktionsgenerators eine Sinusspannung mit  $U_{SS} = 5V$  an das Netzwerk. Messen Sie für geeignete Frequenzen sowohl die Ein- und Ausgangsspannung  $U_a$  und  $U_e$ , als auch die zeitliche Verschiebung  $\Delta t$  beider Spannungen und tragen Sie sowohl die Messwerte, als auch die berechneten Werte in  $^\circ$  bzw. dB in Tabelle 2 ein. Zeichnen Sie Ihre Werte in das Bode-Diagramm in Abbildung 20 ein und vergleichen Sie diese mit dem gegebenen Diagramm.

$\omega$											rad/s
$f$											Hz
$U_e$											V
$U_a$											V
$\Delta t$											s
$\phi$											$^\circ$
$U_a/U_e$											dB

Tabelle 2: Frequenzgang Operationsverstärker

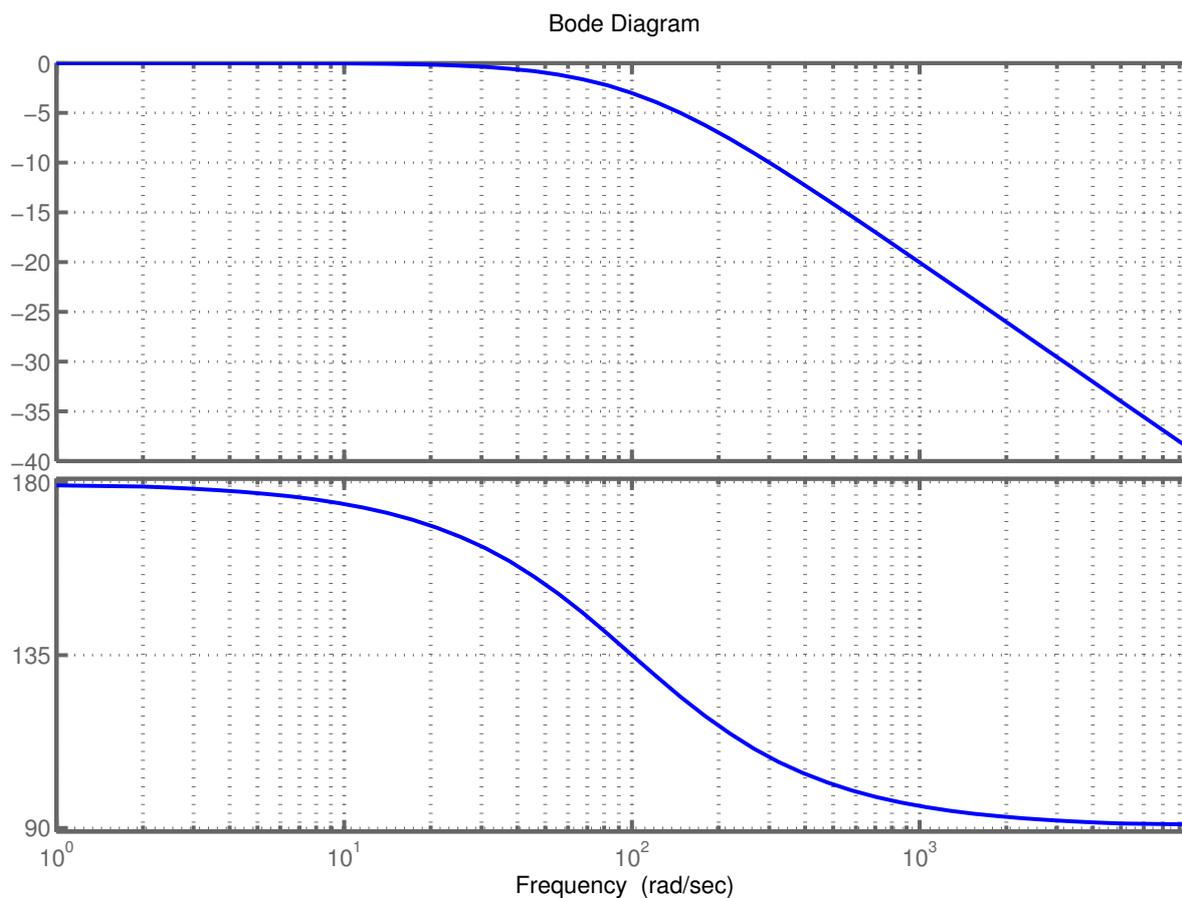


Abbildung 20: Bode-Diagramm Operationsverstärkerschaltung

## D.6 Einsatz analoger Schaltungen als Regler

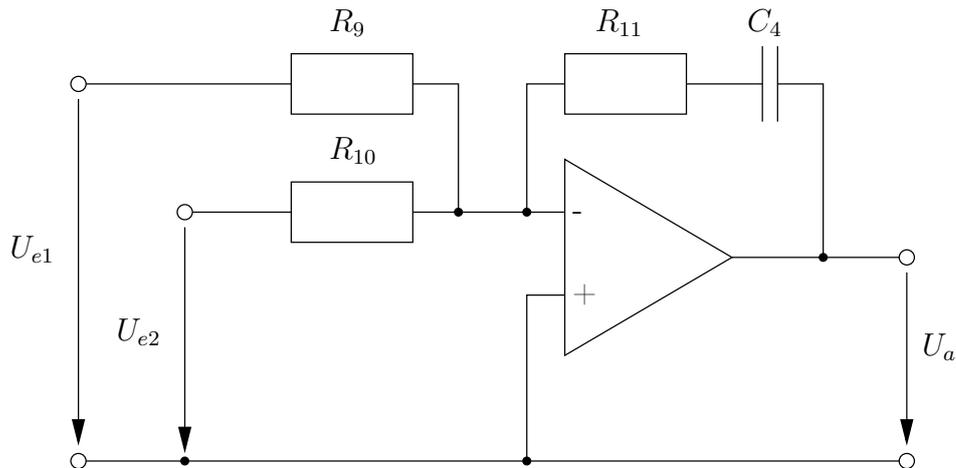


Abbildung 21: Operationsverstärkerschaltung eines Reglers

- Bauen Sie die in Abbildung 21 gezeigte Schaltung auf. Nutzen Sie diese Schaltung als Regler für eine der Regelstrecken (z.B. Föhn).
- Wo können Sie die Führungsgröße variieren? Was passiert, wenn Sie dies tun?

- Welche Störungen können auftreten? Beobachten Sie die Reaktion des geschlossenen Regelkreises auf einzelne Störungen. Können Sie das Verhalten erklären?

- Welche Bauteile haben Sie gewählt und wie beeinflussen deren Werte Ihrer Meinung nach das Verhalten des Reglers? Variieren Sie deren Größe.

$R_9$	$R_{10}$	$R_{11}$	$C_4$

## E Literaturhinweise

Der Ausdruck in Klammern gibt die interne Kennung der TU-Bibliothek an.

- [1] Schuster, C.: *Skript zur Vorlesung Elektrotechnik II*. TUHH, 2008
- [2] Ackermann, G.: *Skript zur Vorlesung Grundlagen der Elektrotechnik für Studierende des Maschinenbaus.*, TUHH, 2008.
- [3] Albach, M.: *Grundlagen der Elektrotechnik: Band 2*. München: Pearson Studium, 2006 (ETB-336)
- [4] Hagmann, G.: *Grundlagen der Elektrotechnik*. Wiebelsheim: Aula-Verlag, 2005 (ETB-361)
- [5] Rost, A.: *Grundlagen der Elektronik*. Berlin: Akad.-Verlag, 1992 (EKB-305)
- [6] Müller, H. et al.: *Moeller Grundlagen der Elektrotechnik*. Stuttgart: Teubner, 2005 (ETB-331)
- [7] Kories, R.: *Taschenbuch der Elektrotechnik*. Frankfurt-am-Main: Deutsch, 2006 (ETB-122)
- [8] Lunze, J.: *Regelungstechnik I*. Berlin: Springer, 2006 (RTB-373)
- [9] Carter, H.: *Kleine Oszilloskoplehre*. Heidelberg: Hüthig, 1991 (MTE-600)
- [10] Bronstein, I.N.: *Taschenbuch der Mathematik*. Leipzig: Teubner, 1991 (MAB-100)