

## **Datenerfassung mit LabVIEW<sup>®</sup>**

### **Versuchsanleitung**

# Vorwort

Moderne Messwerterfassung und viele Experimente werden heute mit der Unterstützung des Computers durchgeführt. Teilweise aus rein praktischen Gründen, um eine hohe Anzahl von Messwerten aufzunehmen und zu verarbeiten, aber auch um eine einfache und übersichtliche Steuerung von Experimenten und Versuchsaufbauten zu gewährleisten. Viele Messwerte sind aus zeitlichen Gründen nicht „von Hand“ aufnehmbar, da sie in sehr kurzen Zeitabständen registriert werden müssen oder aber auch bei Langzeitexperimenten nur sehr selten und in langen Zeitabständen aufeinander folgen. Auch bieten Softwareprogramme und Computerlösungen oft eine äußerst flexible und individuelle Lösung für die verschiedensten Anwenderprobleme. Die ehemals starren Grenzen zwischen reiner Messwerterfassung und Steuerung verschieben sich immer mehr, denn die flexiblen Möglichkeiten der Datenerfassung, der Analyse, der Steuerung und der Visualisierung verschmelzen mehr und mehr zu einer einheitlichen Software-Einheit. Das ursprünglich in den 80er Jahren von National Instruments für die Mess- und Automatisierungstechnik entwickelte Programm *LabVIEW*<sup>®</sup> (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) ist mittlerweile immer mehr zu einer effektiven Alternative für herkömmliche Programmiersprachen geworden und zählt heute neben C zu den meistverwendeten Programmiersprachen für technisch wissenschaftliche Anwendungen. Um physikalische Experimente zu steuern und durchzuführen, muss der Anwender meist eine textorientierte Programmiersprache wie C, Pascal oder Basic beherrschen. Sehr oft muss man sich mehr mit der Syntax der Sprache auseinandersetzen als mit der eigentlichen Messaufgabe. *LabVIEW*<sup>®</sup> bietet hier eine ganz neue Möglichkeit. Statt seitenweise komplizierte Systemprogramme zu schreiben, sind lediglich grafische Elemente auf dem Bildschirm zu plazieren, und wie aus dem Labor bekannt, diese mit Drähten zu verbinden. Bedienungselemente, wie sie aus der Labormesstechnik geläufig sind, bilden die Bedienungsfläche, die der Anwender selbst gestalten kann. Im Idealfall wird die Problembeschreibung, Problemlösung und die Dokumentation in einem Arbeitsgang erledigt. Die eigentlich zu lösende Aufgabe rückt mit Hilfe dieser grafischen Programmierung wieder in den Vordergrund und gleichzeitig werden die nicht problembezogenen Aufgaben minimiert sowie die Programmentwicklungszeit erheblich verkürzt. *LabVIEW*<sup>®</sup> bietet ebenfalls den entscheidenden Vorteil der Plattformunabhängigkeit und ist somit sehr flexibel einsetzbar.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundlagen</b>	<b>5</b>
1.1 Allgemeines zum Versuchsaufbau	5
1.1.1 Das Steckbrett	5
1.1.2 Messgeräte/Netzteile	5
<b>2 Datenerfassung mit LabVIEW: Die A/D-Wandler-Karte</b>	<b>8</b>
2.1 Spannungsmessung und -erzeugung	8
2.1.1 Einzelne Messwerte	8
2.1.2 Zeitabhängige Messungen	10
2.1.3 Spannungserzeugung	12
2.2 Grafische Darstellungen	13
2.2.1 Signalverlaufsgraphen	13
2.2.2 XY-Graphen	14
2.3 Export von Messdaten	14
2.3.1 Erzeugen von Wertetabellen	14
2.3.2 Export von Graphen	17
2.4 Auswertung mit LabVIEW	18
2.4.1 Statistikfunktionen	18
2.4.2 Signalverlaufsmessungen	19
2.5 Übungsaufgaben	20
<b>3 Pflichtversuche</b>	<b>22</b>
3.1 Aufnahme von Kennlinien	22
3.1.1 Der Ohmsche Widerstand	22
3.1.2 Die Z-Diode	22
3.1.3 Der Kondensator	23
3.1.4 Der Transistor	24
3.2 Transistorschaltungen	24
3.2.1 Der Transistorverstärker	24
3.2.2 Der Schmitt-Trigger	25
3.3 Der Operationsverstärker	27
3.3.1 Grundlagen	27
3.3.2 Der invertierende Verstärker	27
3.3.3 Der nichtinvertierende Verstärker	28
3.3.4 Der Differenzverstärker	29
3.3.5 Der Leistungsverstärker	30
3.3.6 Der Impedanzwandler	30

<b>4</b>	<b>Wahlversuche</b>	<b>32</b>
4.1	Die Solarzelle . . . . .	32
4.1.1	Versuchsaufbau . . . . .	32
4.1.2	Messelektronik . . . . .	32
4.1.3	Durchführung . . . . .	34
4.2	Das Doppelpendel . . . . .	35
4.2.1	Theorie . . . . .	36
4.2.2	Versuchsablauf . . . . .	37
4.3	Der Operationsverstärker . . . . .	38
4.3.1	Der Integrierer . . . . .	38
4.3.2	Der Differenzierer . . . . .	39
4.3.3	Der Komparator . . . . .	40
4.3.4	Der Schmitt-Trigger . . . . .	40
4.3.5	Die astabile Kippstufe . . . . .	41
4.3.6	Der Sägezahn-Generator . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Ablauf des Versuches</b>	<b>44</b>
5.1	Die Versuchswoche . . . . .	44
5.2	Der Seminarvortrag . . . . .	44
5.3	Das Versuchsprotokoll . . . . .	45
<b>6</b>	<b>Vorbereitung</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>Fragen und Aufgaben</b>	<b>47</b>
7.1	Pflichtversuche . . . . .	47
7.2	Wahlversuche . . . . .	47
7.2.1	Solarzelle . . . . .	48
7.2.2	Gekoppeltes Pendel . . . . .	48
7.2.3	Operationsverstärker . . . . .	48

# Kapitel 1

## Grundlagen

Bei dem Versuch „Datenerfassung mit *LabVIEW*<sup>©</sup>“ geht es in erster Linie um die zunehmend wichtiger werdende computerunterstützte Messwerterfassung und Steuerung von Experimenten. Die Datenerfassung erfolgt über eine Multifunktionskarte, die als Einsteckkarte in einen PC eingebaut ist. Mit dieser A/D-Wandler-Karte lassen sich sowohl analoge als auch digitale Ein- und Ausgänge realisieren, wobei der größte Teil der Versuche auf Steckbrettern aufgebaut und an die A/D-Karte angeschlossen wird. Diese Experimente beinhalten hauptsächlich kleinere Schaltungen mit bereits aus dem Anfänger-Praktikum bekannten Bauelementen. Das Erstellen der *LabVIEW*<sup>©</sup>-Programme, mit denen die Messwerte erfasst und grafisch dargestellt werden, wird zunächst die meiste Zeit in Anspruch nehmen. Neben einer vernünftigen Darstellung und Dokumentation der durchgeführten Messungen wird eine angemessenen **Interpretation und Diskussion der Ergebnisse erwartet**. Im Anschluss an den Pflichtteil des Praktikums stehen mehrere Wahlversuche zum freien Experimentieren und vertiefen der *LabVIEW*<sup>©</sup>-Kenntnisse zur Auswahl.

Eine vollständige Darstellung bzw. Einführung in *LabVIEW*<sup>©</sup> kann aufgrund des großen Umfangs im Rahmen dieser Versuchsanleitung nicht gegeben werden. Gleiches gilt für die den Versuchen zu Grunde liegenden Kenntnisse über die verwendeten elektronischen Bauteile. Im Rahmen der Vorbereitung auf diesen Versuch sollten Sie sich anhand bekannter oder der in Kapitel 6 angegebenen Literatur diese Grundlagen aneignen. Weiterführende Informationen erhalten Sie auch bei den Betreuern des Versuchs.

### 1.1 Allgemeines zum Versuchsaufbau

#### 1.1.1 Das Steckbrett

Um die Schaltungen schnell und ohne Löten aufbauen zu können, steht an jeden Versuchsplatz ein Elektronik-Steckbrett zur Verfügung, in das die Bauteile direkt eingesteckt werden können. Abb. 1.1 zeigt, wie das Steckbrett aufgebaut ist. Jedes Quadrat stellt einen Einsteckpunkt dar, in den ein Anschluss eines Bauelementes gesteckt werden kann. Die Punkte, die durch Linien verbunden sind, sind elektrisch miteinander verbunden. Als zusätzliche Verbindungen können Drahtsteckbrücken eingesetzt werden.

#### 1.1.2 Messgeräte/Netzteile

Zur Kontrolle der aufgebauten Schaltungen und ersten Fehleranalyse steht an jedem Messplatz ein Hand-Multimeter zur Verfügung. Ebenso können kompliziertere Signale

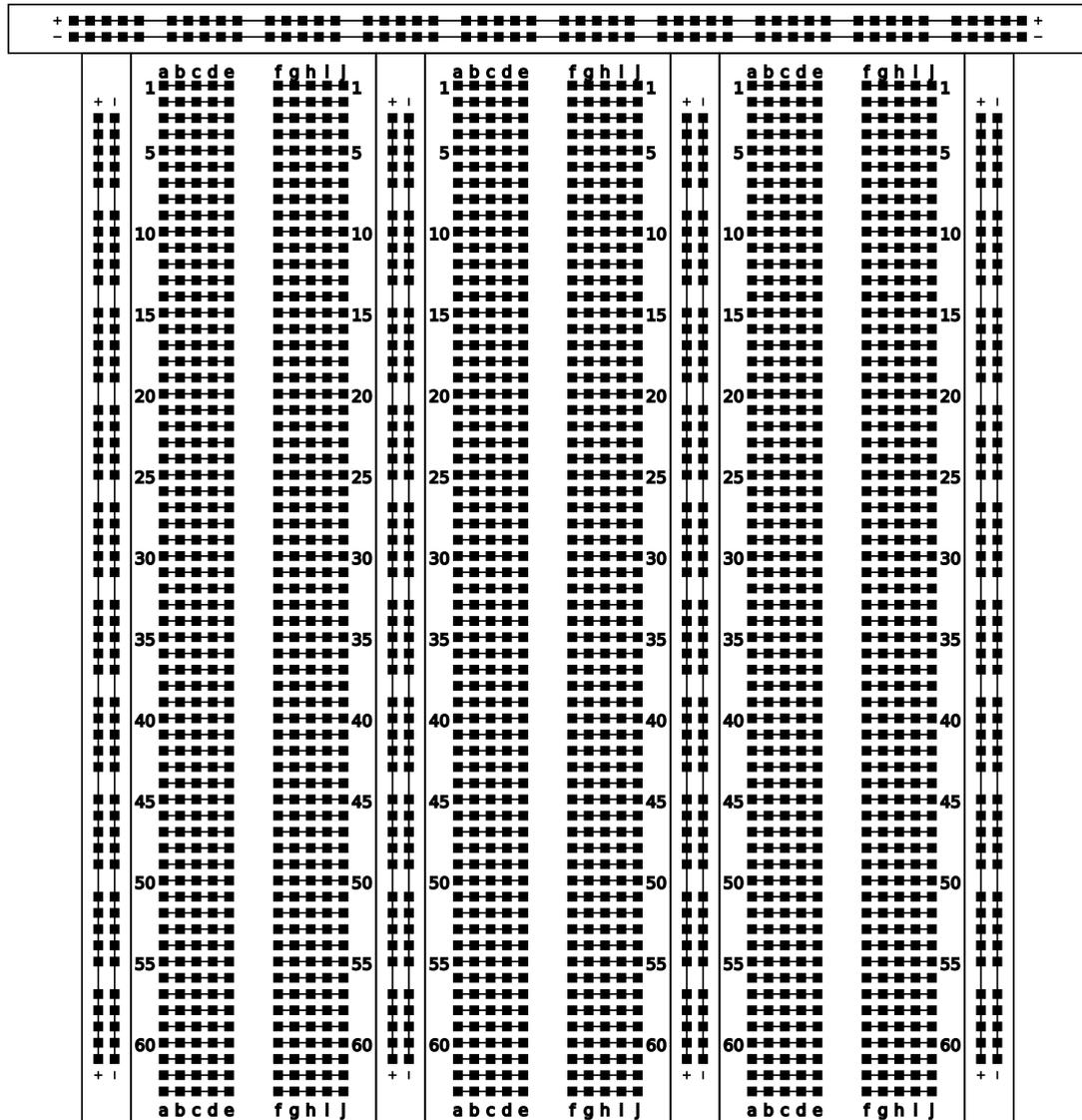


Abbildung 1.1: Die innere Verdrahtung des Steckbretts

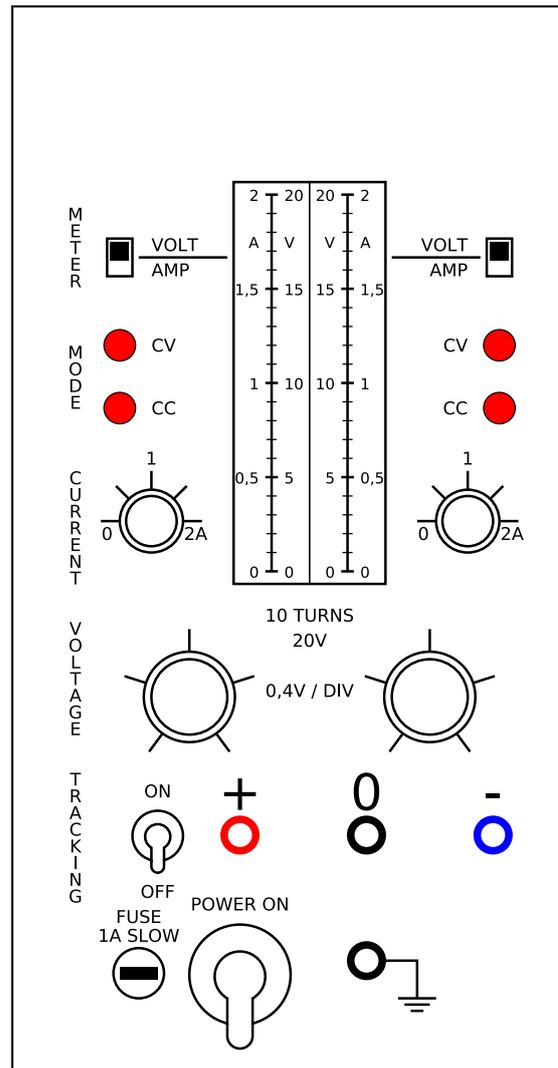


Abbildung 1.2: Das symmetrische Netzteil

mit Hilfe eines Oszilloskops analysiert werden.

Als externe Spannungsversorgung für die aufzubauenden Schaltungen existieren diverse Netzteile. Unter anderem handelt es sich dabei um die in Abb. 1.2 schematisch dargestellte symmetrische Spannungsversorgung, die insbesondere zum Betrieb der verwendeten Operationsverstärker benötigt wird.

## Kapitel 2

# Datenerfassung mit LabVIEW: Die A/D-Wandler-Karte

Die Datenein- und ausgabe am Messrechner geschieht über eine A/D-Wandler-Karte, die analoge Spannungssignale von den aufgebauten Schaltungen einlesen, aber auch Spannungen zur Ansteuerung der Bauteile ausgeben kann. Die Kommunikation zwischen *LabVIEW*® und der A/D-Wandler-Karte wird von Sub-VI's übernommen, die vorgefertigt zur Verfügung stehen. Ihre Funktion wird im Folgenden erläutert.

### 2.1 Spannungsmessung und -erzeugung

#### 2.1.1 Einzelne Messwerte

Zur Erfassung eines einzelnen Spannungswertes bzw. zur Durchführung einer einmaligen Messung mehrerer Eingangskanäle verwenden Sie die VIs *Sample Channel* und *Sample Channels*, die eine Messung an einem bzw. mehreren Kanälen vornehmen. Die Ein- und Ausgänge sind dabei wie folgt zu beschalten:

- *device*: Laufende Nummer der DAQ-Karte. Da nur eine Karte installiert ist, ist dies stets 1.
- *channel(s)*: String, der den zu messenden Kanal bzw. die zu messenden Kanäle, durch Kommas getrennt angibt. Die Kanäle sind von 0 bis 7 fortlaufend nummeriert. Um mit einem *Sample Channel* VI den Wert des Kanals 4 abzufragen, geben Sie den String "4" ein. Für eine Messung der Kanäle 5 und 6 mit einem *Sample Channels* VI lautet die Eingabe "5,6".
- *high limit*, *low limit*: Zu verwendender Messbereich. Die DAQ-Karte hat eine Auflösung von 12 Bit, d.h. der Messbereich wird in  $2^{12} = 4096$  Schritte eingeteilt. Die maximale Messgenauigkeit entspricht der Schrittweite. Daher ist es sinnvoll,

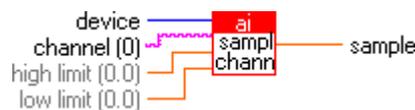


Abbildung 2.1: Sample Channel



Abbildung 2.2: Sample Channels

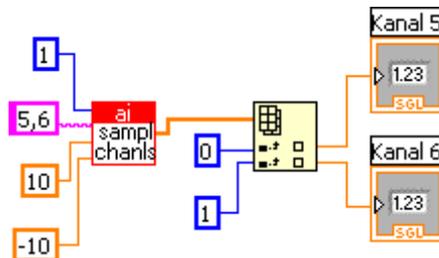


Abbildung 2.3: Auslesen der einzelnen Kanäle

den Messbereich so klein wie möglich zu wählen. Es ist jedoch darauf zu achten, dass das Signal innerhalb des Messbereichs liegt. Liegt das Signal oberhalb bzw. unterhalb des Messbereichs, so wird stattdessen ohne weitere Warnung die obere bzw. untere Grenze des Messbereichs ausgegeben. Überprüfen Sie daher mit einem Multimeter, ob Ihr Signal innerhalb des Messbereiches liegt.

- *sample(s)*: Ergebnis der Messung in Volt gegenüber der Masse. Beim Sample Channel VI ist dies in einzelner Spannungswert. Das Sample Channels VI liefert die Werte in Form eines Arrays. Die 0-Komponente des Arrays enthält den Spannungswert des Kanals, der zuerst bei *channels* genannt wurde.

Der Vorteil bei der Verwendung des Sample Channels VIs gegenüber mehreren Sample Channel VIs liegt in der (fast) gleichzeitigen Erfassung der Messwerte. Diese ist bei der Verwendung mehrerer Sample Channel VIs nicht garantiert, da die einzelnen Messungen vom Computer zu nicht festgelegten Zeitpunkten (asynchron) ausgelöst werden. Dagegen werden beim Sample Channels VI alle Messungen zum gleichen Zeitpunkt ausgelöst und dann nacheinander abgearbeitet. Die Verzögerung zwischen zwei Messungen liegt im Bereich der Messdauer von einigen Mikrosekunden.

Bei der Verwendung des Sample Channels VIs werden die Messwerte für die einzelnen Kanäle in Form eines Arrays ausgegeben. Um dieses aufzuspalten und die einzelnen Messwerte zu trennen, kann man das VI *Array indizieren* verwenden. Seine Beschaltung in Verbindung mit dem Sample Channels VI ist in Abb. 2.3 dargestellt. Im Beispiel enthält die Ausgabe des Sample Channels VIs zwei Werte, die den Spannungen an den Eingängen 5 und 6 der DAQ-Karte entsprechen. Um diese zu trennen, wird das Array einem Array indizieren VI zugeführt. Dieses liest die Werte an den Positionen 0 und 1 das Arrays aus, die den beiden gemessenen Spannungswerten entsprechen.

Um einen oder mehrere Kanäle wiederholt zu messen, können Sie die beiden genannten VIs in eine While- oder For-Schleife einbauen. Allerdings wird der zeitliche Ablauf der Messung in diesem Fall vom Computer gesteuert, der zusätzlich mit anderen Aufgaben beschäftigt sein kann. Ein genaues Timing der Messungen ist somit nicht möglich. Verwenden Sie daher für alle zeitabhängigen Messungen (z.B. Signalverläufe, Frequenzen, Phasenverschiebungen, Anstiegs- / Abfallzeiten...) die Acquire Waveform(s) VIs.

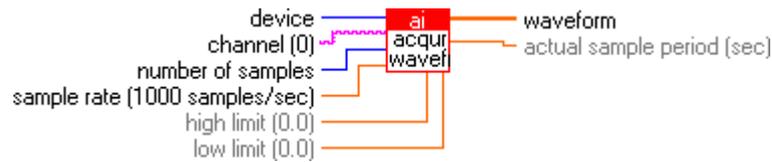


Abbildung 2.4: Acquire Waveform



Abbildung 2.5: Acquire Waveforms

### 2.1.2 Zeitabhängige Messungen

Mit den VIs *Acquire Waveform* und *Acquire Waveforms* lassen sich mehrere Messungen eines oder mehrerer Kanäle in festen Zeitabständen durchführen. Der zeitliche Ablauf der Messung wird dabei von der DAQ-Karte übernommen und ist daher unabhängig von den übrigen Aufgaben des Computers. Auf diese Weise lassen sich exakte Messungen zeitlich veränderlicher Signale realisieren.

Beachten Sie, dass LabVIEW während der gesamten Ausführungszeit eines der genannten VIs, d.h. während der gesamten Messzeit blockiert ist und nicht auf Benutzereingaben reagiert. Der Abbruch einer zu lang angesetzten Messung ist daher nur durch “Abschießen” des Programmes möglich, was einen Datenverlust zur Folge haben kann, wenn noch ungespeicherte VIs geöffnet sind!

Die Beschaltung ist ähnlich zu den Sample Channel(s) VIs:

- *device*: Laufende Nummer der DAQ-Karte, immer auf 1 zu setzen.
- *channel(s)*: String mit der Nummer des zu messenden Kanals bzw. mit den durch Kommas getrennten Nummern der zu messenden Kanäle.
- *number of samples (/ ch)*: Anzahl der Messpunkte, die für jeden Kanal aufgenommen werden. Wenn nur ein Messkanal vorhanden ist, entspricht diese der Anzahl der insgesamt aufgenommenen Messpunkte. *sample / scan rate*: Anzahl der Samples (= Einzelmessungen im Fall eines Kanals) bzw. Scans (= Messungen aller Kanäle im Fall mehrerer Kanäle) pro Sekunde. Beachten Sie, dass die verwendete DAQ-Karte maximal 225000 Samples pro Sekunde aufzeichnen kann. Bei  $n$  Kanälen beträgt die maximale Scanrate daher  $225000/n$ .
- *high limit, low limit*: Ober- und Untergrenze des Messbereichs.
- *waveform(s)*: Aufgezeichnete Messwerte, in Volt. Im Falle des Acquire Waveform VIs handelt es sich dabei um ein Array, das an der Position 0 die erste Messung und dann alle weiteren Messungen in aufsteigender Reihenfolge enthält. Das Acquire Waveforms VI liefert ein 2D-Array, dessen erster Index die Messung durchnumeriert, während der zweite Index die gemessenen Kanäle in der bei *channels* eingegebenen Reihenfolge abzählt.

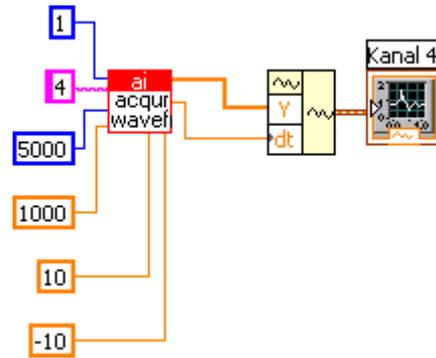


Abbildung 2.6: Erzeugung eines Signalverlaufs

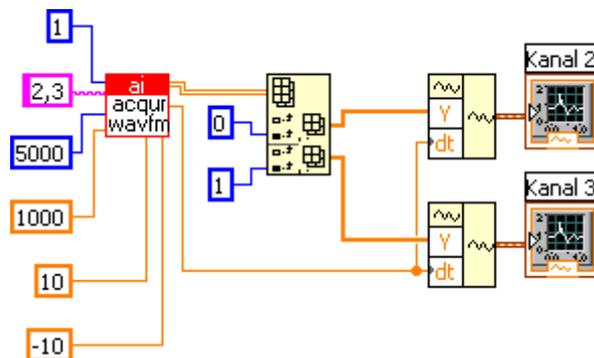


Abbildung 2.7: Aufspaltung in mehrere Signalverläufe

- *actual sample / scan period*: Zeit in Sekunden zwischen zwei Samples (bei Acquire Waveform) bzw. Scans (bei Acquire Waveforms). Diese kann von dem Wert abweichen, der über die Messrate eingestellt wurde, da nur Zeitschritte möglich sind, die sich mit dem internen Zeitgeber der DAQ-Karte realisieren lassen.

LabVIEW ermöglicht es, die von einem Acquire Waveform VI gelieferten Spannungsdaten mit dem Zeitschritt zusammen zu einem besonderen Datentyp zusammenzuführen, der als Signalverlauf bezeichnet wird. Dieser beschreibt, wie der Name bereits andeutet, den zeitlichen Verlauf eines Signals und enthält sowohl die Spannungs-, als auch die Zeitinformation. Signalverläufe können als Eingabe für einen Signalverlaufsgraphen genutzt werden, wobei die Zeitachse durch die Zeitinformation geeicht wird. Darüber hinaus lassen sich aus einem Signalverlauf z.B. Signalfrequenzen messen.

Zur Erzeugung eines Signalverlaufes dient das VI *Signalverlauf erstellen*, dessen Anwendung in Abb. 2.6 dargestellt ist. Das Array mit den Spannungswerten, das vom Acquire Waveform VI geliefert wird, wird dem Y-Eingang zugeführt. Der Zeitschritt zwischen zwei Messungen wird mit dem dt-Eingang verbunden. Die einzelnen Eingänge dieses VIs lassen sich durch Anklicken bzw. durch "Aufziehen" mit der Maus einstellen. Als Ausgabe erhält man den gewünschten Signalverlauf.

Durch Verwendung mehrerer Acquire Waveform VIs ist es nicht möglich, mehrere Signale zeitgleich aufzunehmen, da die einzelnen VIs nacheinander ausgeführt werden und somit auch die Signale nacheinander aufgezeichnet werden. Daher ist es erforderlich, ein Acquire Waveforms VI zu verwenden, das mehrere Kanäle gleichzeitig misst und



Abbildung 2.8: Update Channel



Abbildung 2.9: Update Channels

zu einem 2D-Array zusammenfasst. Um die einzelnen Signale daraus zu extrahieren, ist wie schon beim Sample Channels VI eine Aufspaltung dieses Arrays erforderlich. Auch in diesem Fall wird wieder das Array indizieren VI benutzt. Sobald man ein 2D-Array an seinen Eingang anlegt, verdoppelt sich die Anzahl der Index-Eingänge. Der erste Index numeriert dabei die einzelnen Messungen durch, während der zweite Index den Kanal numeriert. Zur Trennung der einzelnen Kanäle ist es daher erforderlich, jeweils den zweiten Indexeingang zu beschalten und den ersten Eingang offen zu lassen. Am Ausgang erhält man dann ein 1D-Array mit Messdaten, das sich wie auch schon bei einem Acquire Waveform VI weiterverwenden und in einen Signalverlauf umwandeln lässt.

### 2.1.3 Spannungserzeugung

So wie sich einzelne Spannungswerte an einem oder mehreren Eingangskanälen messen lassen, kann man auch die Ausgangskanäle mit einem Spannungswert belegen, der nach seiner Einstellung konstant bleibt. Dazu dienen die VIs *Update Channel* und *Update Channels*, die wie folgt zu beschalten sind:

- *device*: Laufende Nummer der DAQ-Karte, immer auf 1 zu setzen.
- *channel(s)*: String mit der Nummer des Ausgangskanals, bzw. der zu setzenden Ausgangskanäle (durch Kommas getrennt).
- *value(s)*: Auszugebender Spannungswert (in Volt) im Fall des Update Channels VIs, bzw. ein Array mit den auszugebenden Werten im Fall des Update Channels VIs. Bei letzterem wird der Spannungswert an Position 0 des Arrays am ersten unter *channels* genannten Kanäle ausgegeben, der Wert an Position 1 am zweiten usw.

Analog zur Messung eines zeitabhängigen Signals ist auch dessen Erzeugung möglich. Dafür dienen die VIs *Generate Waveform* bzw. *Generate Waveforms*. Für die Beschaltung gilt:



Abbildung 2.10: Generate Waveform



Abbildung 2.11: Generate Waveforms

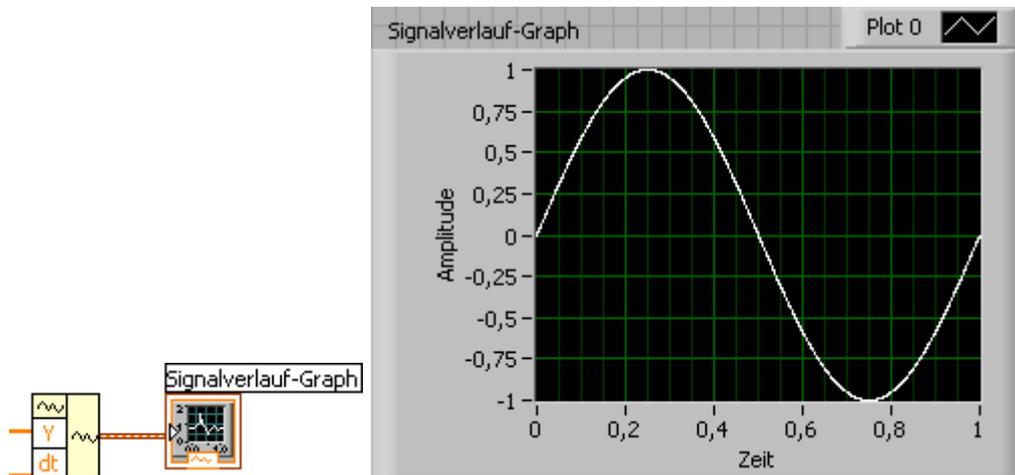


Abbildung 2.12: Signalverlaufsgraph

- *device*: Laufende Nummer der DAQ-Karte, immer auf 1 zu setzen.
- *channel(s)*: String mit der Nummer des Ausgangskanals, bzw. der zu setzenden Ausgangskanäle (durch Kommas getrennt).
- *update rate*: Anzahl der in einer Sekunde ausgegebenen Spannungswerte.
- *waveform(s)*: 1D-Array mit Spannungswerten für einen Kanal, die der Reihe nach ausgegeben werden sollen (im Fall des Generate Waveform VIs) bzw. 2D-Array mit Wertepaaren, die jeweils gleichzeitig an den unter *channels* genannten Ausgängen ausgegeben werden sollen.

Beachten Sie, dass während der Ausgabe eines solchen Signals keine gleichzeitige Messung möglich ist. Es ist daher nicht möglich, gleichzeitig ein Signal zu erzeugen und dieses Signal (bzw. das Ausgangssignal einer Schaltung, die mit diesem Signal gespeist wird) mit der gleichen DAQ-Karte zu messen. Dafür sind andere Signalquellen erforderlich.

## 2.2 Grafische Darstellungen

### 2.2.1 Signalverlaufsgraphen

Häufig ist es erforderlich, ein zeitlich veränderliches Signal in Abhängigkeit von der Zeit darzustellen. Dies ist besonders einfach, wenn das Signal bereits in Form eines Signalverlaufes vorliegt. Dieser Datentyp enthält sowohl die Messwerte, als auch eine Information über deren zeitlichen Verlauf. Diese Informationen sind für eine grafische Darstellung ausreichend.

Abb. 2.12 zeigt ein Beispiel für eine Anwendung des Signalverlaufsgraphen. Als Eingangssignal dient in diesem Fall ein Signalverlauf, der aus einem Array von Messwerten

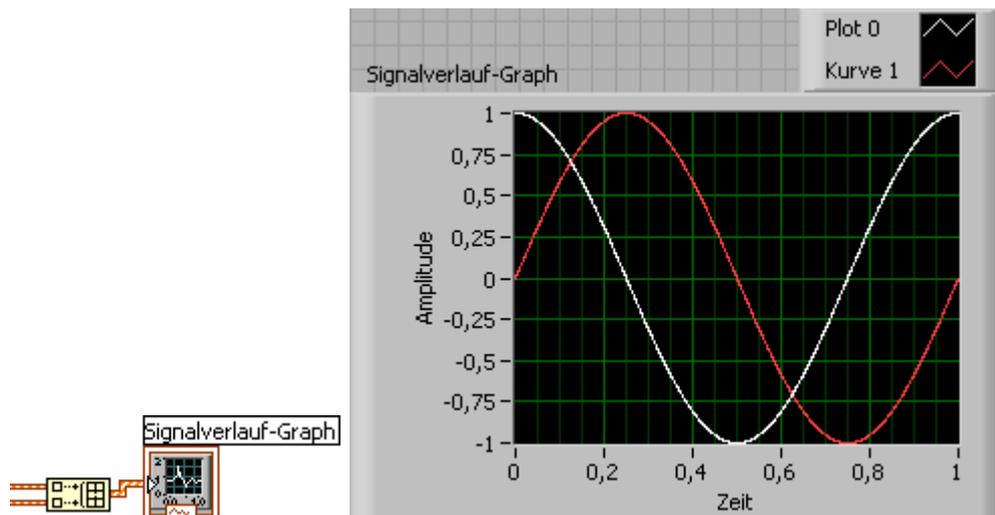


Abbildung 2.13: Darstellung mehrerer Signalverläufe

und einem Zeitschritt erzeugt wird. Im Frontpanel sieht man den Graphen, in diesem Fall ein Sinussignal.

Um mehrere Signalverläufe in einem gemeinsamen Graphen darzustellen, muss man zunächst ein Array aus Signalverläufen erstellen. Dafür lässt sich das Array erstellen VI verwenden, das als Eingabe die einzelnen Signalverläufe erhält. Dies ist in Abb. 2.13 dargestellt.

## 2.2.2 XY-Graphen

Um mehrere Datensätze (z.B. Strom und Spannung oder Eingangsspannung und Ausgangsspannung einer Schaltung) gegeneinander aufzutragen, verwendet man einen XY-Graphen. Die in Abb. 2.14 dargestellte Variante ist im Frontpanel unter dem Namen *Express-XY-Graph* zu finden. Die beiden Eingänge, die mit *X-Eingang* und *Y-Eingang* bezeichnet sind, erwarten einen Datentyp, der als *dynamische Daten* bezeichnet wird. Verbindet man (wie im Beispiel gezeigt) ein Array mit einem der Eingänge, so fügt LabVIEW automatisch einen Umwandlungsknoten ein. Somit lassen sich zwei Arrays unmittelbar gegeneinander auftragen.

Genau wie auch beim Signalverlaufgraphen können auch beim XY-Graphen mehrere Plots in einem einzelnen Diagramm dargestellt werden. Dies ist in Abb. 2.15 dargestellt. Wieder werden die Messdaten, die in Form von Arrays vorliegen, in dynamische Daten konvertiert. Diese müssen zusammengeführt werden, bevor sie in die Eingänge des Graphen geleitet werden können. Dazu dient das VI *Signale zusammenfassen*. Es wird automatisch erstellt, sobald mehrere Signalquellen mit einem Eingang des XY-Graphen verbunden werden.

## 2.3 Export von Messdaten

### 2.3.1 Erzeugen von Wertetabellen

Um Messdaten für spätere Auswertungen abzuspeichern, empfiehlt sich die Verwendung einer Wertetabelle. Diese kann später in ein Tabellenkalkulationsprogramm oder ein

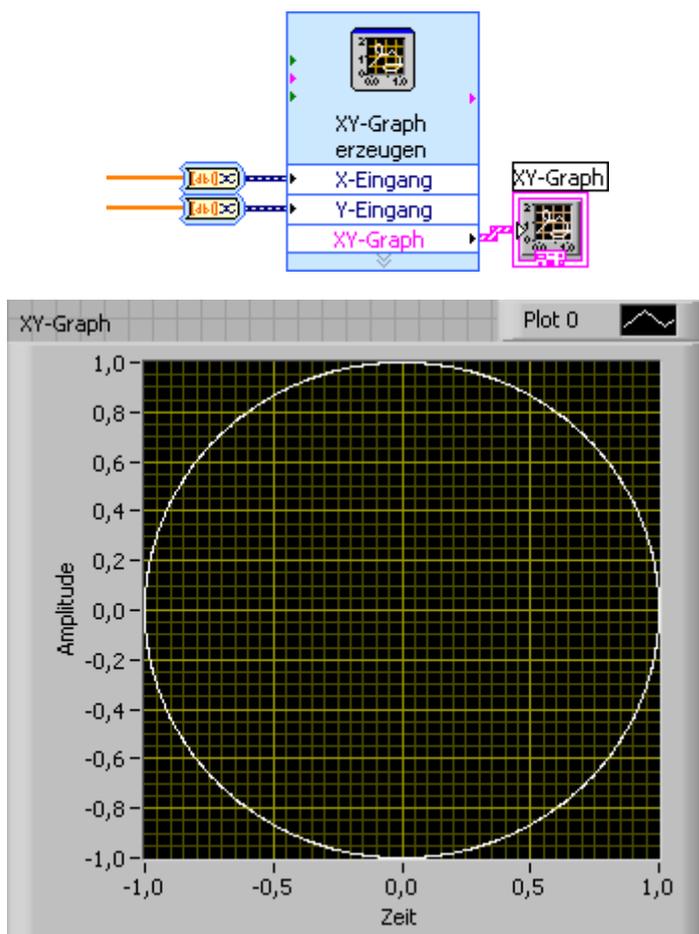


Abbildung 2.14: XY-Graph

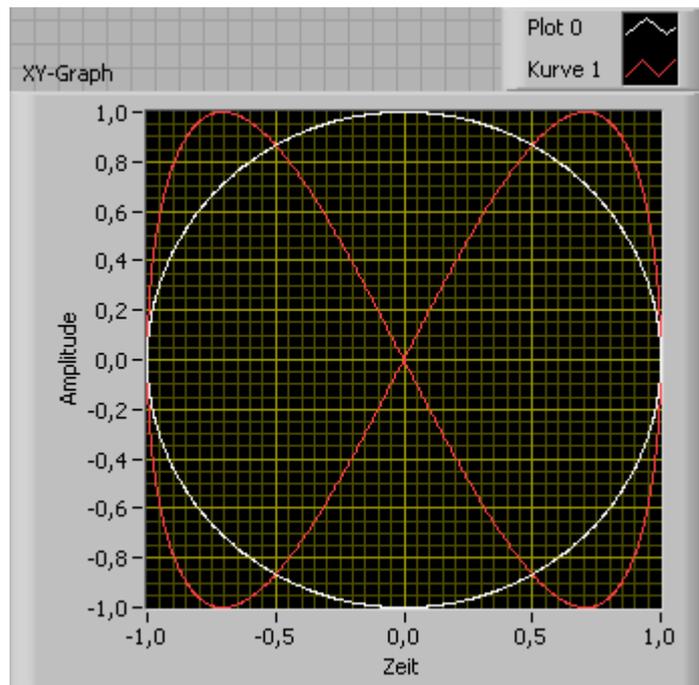
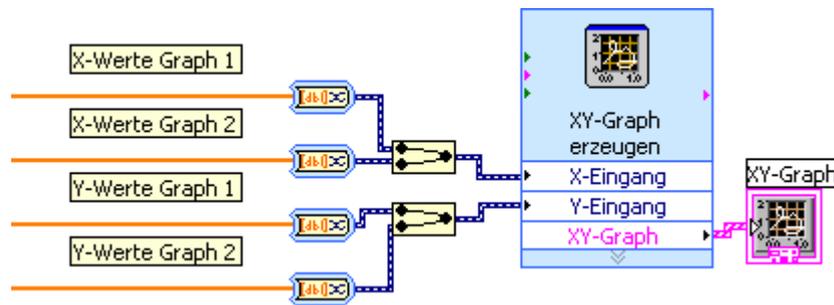


Abbildung 2.15: Darstellung mehrerer XY-Graphen

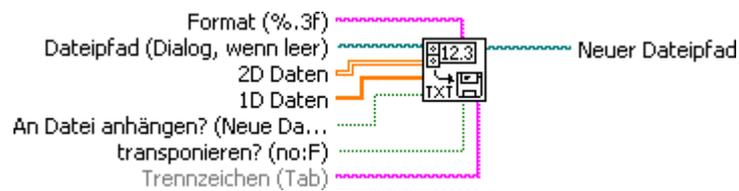


Abbildung 2.16: Speichern einer Wertetabelle

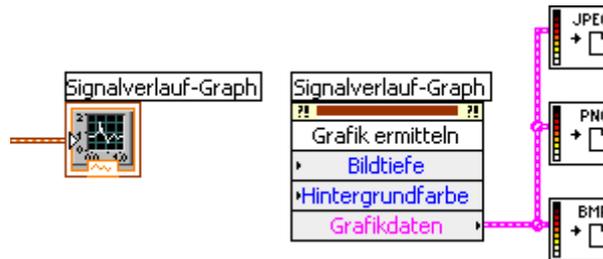


Abbildung 2.17: Exportieren von Graphen

Programm zur Messwertanalyse eingelesen werden. Zum Speichern von Wertetabellen verfügt LabVIEW über das VI *In Spreadsheet-Datei schreiben*. Dieses ist in Abb. 2.16 dargestellt und wie folgt zu beschalten:

- *Format*: Gibt das Zahlenformat für die zu speichernden Daten an. Dabei muss es sich um einen LabVIEW-Format-String handeln. Wenn nichts angegeben wird, wird eine Standardformatierung vorgenommen.
- *Dateipfad*: Gibt den Speicherort der Datei an, in die die Messdaten geschrieben werden sollen. Wird dieser Eingang offen gelassen, erscheint beim Ausführen des VIs ein Dialogfeld, mit dem der Benutzer den Speicherort auswählen kann.
- *2D-Daten*: Zum Speichern mehrerer Messreihen (z.B. Strom und Spannung) sind diese in ein Array zu überführen. Der erste Index gibt dabei die Spalte an, während der zweite Index die Zeile bezeichnet (sofern das Array nicht beim Speichern transponiert wird).
- *1D-Daten*: Wenn nur eine Messreihe gespeichert werden soll, die in Form eines 1D-Arrays vorliegt, ist diese mit diesem Eingang zu verbinden.
- *An Datei anhängen?*: Wird dieser Eingang mit dem Wert *true* verbunden, so werden die Messdaten an eine bereits bestehende Datei angehängt. Ansonsten wird eine neue Datei erstellt bzw. eine bereits bestehende Datei überschrieben.
- *Transponieren?*: Wird dieser Eingang mit dem Wert *true* verbunden, so wird ein unter *2D-Daten* eingegebenes Array vor dem Speichern transponiert, d.h. der erste Index wird zum Zeilenindex und der zweite Index wird zum Spaltenindex.
- *Trennzeichen*: Dieses Zeichen trennt die Daten, die zu zwei benachbarten Spalten gehören. Standardmäßig ist ein Tabulator eingestellt. Achten Sie beim Ändern dieses Wertes darauf, welche Trennzeichen Ihr Auswertungsprogramm erkennt.
- *Neuer Dateipfad*: Gibt nach erfolgreicher Ausführung des VIs an, wo die Datei gespeichert wurde. Dieser Wert kann weiteren VIs zugeführt werden, die Daten an die gleiche Datei anhängen sollen.

### 2.3.2 Export von Graphen

LabVIEW ermöglicht es, Graphen direkt aus einem VI zu exportieren, d.h. die Grafikdaten eines Diagramms in eine Grafikdatei zu schreiben. Um diese Grafikdaten zu erhalten, benötigt man einen Methodenknoten. Diesen erzeugt man, indem man den zu

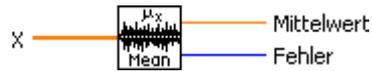


Abbildung 2.18: Mittelwert



Abbildung 2.19: Lineare Regression

exportierenden Graphen im Blockdiagramm mit der rechten Maustaste anklickt und im Kontextmenü den Unterpunkt *Erstelle / Methodenknoten* auswählt. Im Blockdiagramm wird ein Methodenknoten angezeigt, der den gleichen Namen trägt wie das zu exportierende Diagramm. Dies deutet die Verbindung zwischen beiden Symbolen an, die nicht durch eine Linie dargestellt ist.

Um aus dem Methodenknoten die Grafikdaten zu erhalten, muss man nun die richtige Methode auswählen. Dafür klickt man mit der linken Maustaste auf den Methodenknoten (der Mauszeiger sollte sich dabei in eine Hand verwandeln) und wählt die Methode *Grafik ermitteln* aus. Der Methodenknoten nimmt dann die Form an, die in Abb. 2.17 am Beispiel eines Signalverlaufsgraphen dargestellt ist. Die Grafikdaten lassen sich nun einem VI zuführen, das sie in einer Datei abspeichert. Dafür stehen die Formate JPEG, PNG und BMP zur Verfügung.

## 2.4 Auswertung mit LabVIEW

### 2.4.1 Statistikfunktionen

Die einfachste und am häufigsten benötigte Statistikfunktion ist die Berechnung des Mittelwertes aus einer Menge von Werten. Das dafür benötigte VI *Mittelwert* ist in Abb. 2.18 dargestellt.

- *X*: Dieses Array enthält die Werte, deren Mittelwert bestimmt werden soll.
- *Mittelwert*: Der errechnete Mittelwert.
- *Fehler*: Gibt einen von 0 verschiedenen Wert aus, wenn während der Berechnung ein Fehler aufgetreten ist. Dieser Ausgang gibt *keinen* Messfehler, d.h. die Standardabweichung der Messwerte aus!

Wenn zwei Messreihen vorliegen, besteht zwischen beiden im einfachsten Fall ein linearer Zusammenhang. In diesem Fall lässt sich eine lineare Regression durchführen. Dies geschieht mit dem VI *Lineare Anpassung*, das in Abb. 2.19 dargestellt ist.

- *X, Y*: Diese beiden Arrays enthalten die Datensätze, für die eine lineare Regression durchzuführen ist. Achten Sie darauf, dass beide Arrays die gleiche Größe haben.
- *Beste Linear-Anpassung*: Liefert ein Array mit Y-Werten, die auf der Regressionsgeraden liegen und zu den eingegebenen X-Werten gehören. Trägt man diese gegen die X-Werte auf, so erhält man eine Darstellung der Regressionsgeraden.



Abbildung 2.20: Exponentialanpassung

- *Steigung, Nulldurchgang*: Diese Werte bezeichnen die Steigung  $m$  und den Nulldurchgang  $b$  der Regressionsgeraden, wenn diese in der Form  $y = mx + b$  geschrieben wird.
- *MSE*: Der mittlere quadratische Fehler gibt an, wie groß die quadrierte Abweichung zwischen den Messwerten und der Regressionsgeraden im Mittel ist. Wenn  $y_i, i = 1, \dots, n$  die Messwerte bezeichnet und  $f_i, i = 1, \dots, n$  die zugehörigen Werte auf der Regressionsgeraden, errechnet sich der MSE zu

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2 \quad (2.4.1)$$

- *Fehler*: Gibt einen von 0 verschiedenen Wert aus, wenn während der Berechnung ein Fehler aufgetreten ist.

Viele zeitabhängige Vorgänge, wie das Auf- und Entladen eines Kondensators oder die Dämpfung eines Pendels, folgen einem Exponentialgesetz. Um die Exponentialkurve, die zu einem solchen Vorgang gehört, zu bestimmen, dient das VI *Exponentialanpassung*, das in Abb. 2.20 dargestellt und wie folgt zu beschalten ist:

- *X, Y*: Die X- und Y-Werte der Daten, an die eine Exponentialkurve angepasst werden soll. Achten Sie darauf, dass beide Array die gleiche Anzahl an Werten enthalten und dass alle Y-Werte das gleiche Vorzeichen (entweder nur positiv oder nur negativ) haben.
- *Beste Exponential-Anpassung*: Liefert die Y-Werte, die zu den eingegebenen X-Werten gehören und auf der angepassten Exponentialkurve liegen. Damit lässt sich die Kurve grafisch darstellen, indem man sie gegen die X-Werte in einem XY-Diagramm aufrägt.
- *Amplitude, Dämpfung*: Gibt die Amplitude  $A$  und die Dämpfung  $\Delta$  der Ausgleichskurve an, wenn diese in der Form  $y = A \exp(\Delta x)$  geschrieben wird.
- *MSE*: Gibt den mittleren quadratischen Fehler an. Dieser wird wie bei der linearen Regression berechnet.
- *Fehler*: Gibt einen von 0 verschiedenen Wert aus, wenn während der Berechnung ein Fehler aufgetreten ist.

### 2.4.2 Signalverlaufsmessungen

Die am häufigsten in der Elektronik vorkommende Signalform ist das Sinussignal. Dieses wird durch seine Frequenz, seine Amplitude und seine Phase (in Bezug auf ein zweites Signal oder einen festen Zeitgeber) charakterisiert. Um diese Parameter zu bestimmen,

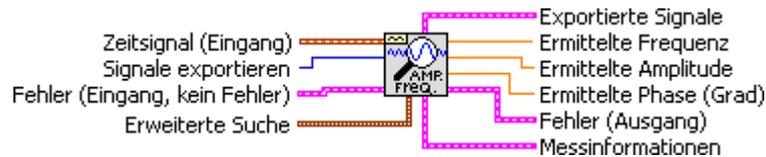


Abbildung 2.21: Messung von Frequenz, Amplitude und Phase

muss das Signal in Form eines Signalverlaufes vorliegen, damit sowohl Zeit- als auch Amplitudeninformationen darin enthalten sind. Dieses kann mit dem VI *Einzel frequenz-Informationen extrahieren* analysiert werden. Seine Beschaltung ist in Abb. 2.21 wiedergegeben.

- *Zeitsignal*: Der zu untersuchende Signalverlauf.
- *Frequenz, Amplitude, Phase*: Gibt die gemessenen Parameter zurück.

Die übrigen Ein- und Ausgänge spielen für die einfache Messung eines Sinussignals keine Rolle.

Statt eines einzelnen Signalverlaufs kann man den Eingang dieses VIs auch mit einem Array aus Signalverläufen verbinden. In diesem Fall erhält man an den Ausgängen ebenfalls Arrays, die die ermittelten Frequenzen, Amplituden und Phasen der einzelnen Signalverläufe enthalten.

## 2.5 Übungsaufgaben

Die folgenden Übungsaufgaben sollen Ihnen dabei helfen, sich in LabVIEW einzuarbeiten und mit den Grundlagen der Datenerfassung und -analyse vertraut zu machen. Sie sind am ersten Versuchstag durchzuführen und müssen nicht für das Versuchsprotokoll dokumentiert werden. Allerdings können Ihnen die erstellten VIs sowie die gewonnenen Kenntnisse im weiteren Verlauf des Versuches nützlich sein. Es müssen nicht alle Übungen durchgeführt werden, es wird aber empfohlen.

- Erstellen Sie ein VI, das zwei Zahlen einliest und als Ausgabe ihre Summe, ihre Differenz, ihr Produkt und ihren Quotienten ausgibt.
- Fügen Sie einen Schalter hinzu, mit dem Sie die beiden Werte vertauschen können.
- Ergänzen Sie Ihr VI durch eine If-Schleife, die überprüft, ob bei der Berechnung durch 0 geteilt werden soll und die in diesem Fall eine Fehlermeldung in einem Textfeld ausgibt.
- Fügen Sie eine While-Schleife hinzu, die das Programm so lange ausführt, bis ein Stop-Button gedrückt wird, der das Programm beendet.
- Basteln Sie ein einfaches Spannungsmessgerät, indem Sie ein Sample Channel VI und eine Drehspulanzeige in eine While-Schleife einbauen. Fügen Sie ein Eingabefeld hinzu, mit dem Sie den Eingangskanal einstellen können. Testen Sie dieses VI, indem Sie unterschiedliche Spannungen an den Eingang der DAQ-Karte anlegen. Beachten Sie dabei unbedingt den maximalen Spannungsbereich von  $-10\text{V}$  bis  $10\text{V}$ !

- Verbinden Sie einen Eingang und einen Ausgang der DAQ-Karte. Erstellen Sie ein VI, das in einer While-Schleife kontinuierlich den Wert eines Eingabefeldes ausliest, ihn über ein Update Channel VI an den Ausgang der DAQ-Karte legt, einen Wert vom Eingang liest und diesen auf einem Drehspulinstrument anzeigt.
- Berechnen Sie in einer For-Schleife 1000 Werte für  $\sin x$  für  $0 \leq x \leq 2\pi$  und speichern Sie diese in einem Array. Erstellen Sie aus diesem Array einen Signalverlauf, indem Sie als Zeitschritt eine Konstante eingeben. Messen Sie die Frequenz des so simulierten Signals und stellen Sie es auf einem Signalverlaufsgraphen dar.
- Berechnen Sie zusätzlich  $\cos x$  in der gleichen For-Schleife und stellen Sie beide Funktionen in einem gemeinsamen Graphen dar. Berechnen Sie die Phasenverschiebung. Tragen Sie beide gegeneinander in einem XY-Graphen auf.
- Erzeugen Sie aus den beiden erstellten Arrays ein 2D-Array und schreiben Sie dieses in eine Tabellendatei. Achten Sie dabei darauf, dass die beiden Funktionen in Form von zwei Spalten ausgegeben werden, indem Sie das Array beim Speichern ggf. transponieren. Exportieren Sie die Graphen in ein Grafikformat Ihrer Wahl.
- Ersetzen Sie die simulierten Signale durch ein reales Signal, das Sie einem Acquire Waveform VI entnehmen. Legen Sie als Eingangssignal eine sinusförmige Wechselspannung von  $f = 1\text{kHz}$  und  $U_{SS} = 2\text{V}$  an. Überprüfen Sie diese mit einem Oszilloskop und mit Ihrem VI.
- Verwenden Sie eine flache Sequenzstruktur, um ein einfaches getriggertes Oszilloskop zu realisieren. Diese Sequenz soll innerhalb einer While-Schleife wiederholt werden und aus zwei Schritten bestehen. Im ersten Schritt wird innerhalb einer While-Schleife wiederholt der Spannungswert an einem Eingang der DAQ-Karte über ein Sample Channel VI abgefragt und mit einem Schwellwert verglichen. Sobald dieser Schwellwert überschritten wird, wird die Schleife beendet. Im zweiten Schritt wird dann mit einem Acquire Waveform VI ein Signal am gleichen Eingang aufgezeichnet und auf einem Signalverlaufsgraphen dargestellt. Konstruieren Sie ihr VI so, dass man mit einem Schalter die Richtung der Triggerflanke einstellen kann.

# Kapitel 3

## Pflichtversuche

### 3.1 Aufnahme von Kennlinien

#### 3.1.1 Der Ohmsche Widerstand

In diesem Versuch soll die  $I(U)$ -Kennlinie eines Ohmschen Widerstandes aufgenommen werden. Da mit der DAQ-Karte nur Spannungen, aber keine Ströme gemessen werden können, muss der Strom indirekt aus dem Spannungsabfall über einem bekannten Messwiderstand  $R_0$  bestimmt werden.

- Bauen Sie die Schaltung gemäß Abb. 3.1 auf und wählen Sie zunächst  $R_0 = 1\text{k}\Omega$  sowie  $100\Omega \leq R_x \leq 10\text{k}\Omega$ . Variieren Sie  $U_E$  im Bereich von  $-10\text{V}$  bis  $10\text{V}$  und stellen Sie  $I$  als Funktion von  $U_A$  grafisch dar. Bedenken Sie dabei, dass der Ausgang der DAQ-Karte mit max.  $5\text{mA}$  belastet werden darf und nutzen Sie Ihr Wissen über Impedanzwandler, um eine geeignete Eingangsspannung zu erzeugen.
- Wiederholen Sie die Messung für fünf weitere Widerstände  $R_x$  und passen Sie ggf. den Messwiderstand  $R_0$  an, um Ihre Messgenauigkeit zu optimieren. Tragen Sie die  $I(U)$ -Kennlinien in ein Diagramm ein und bestimmen Sie die Widerstandswerte  $R_x$  durch lineare Regression.

#### 3.1.2 Die Z-Diode

In diesem Versuch soll die  $I(U)$ -Kennlinie einer Z-Diode aufgenommen und ihre Eigenschaften als Spannungsstabilisierung untersucht werden.

- Bauen Sie die Schaltung gemäß Abb. 3.2 auf und wählen Sie zunächst  $R_0 = 100\Omega$ . Variieren Sie  $U_E$  im Bereich von  $0\text{V}$  bis  $10\text{V}$  und stellen Sie  $I$  als Funktion von  $U_A$  sowie  $U_A$  als Funktion von  $U_E$  grafisch dar.

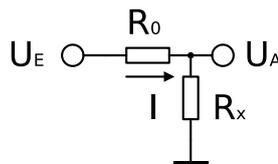


Abbildung 3.1: Schaltung zum Ohmschen Widerstand

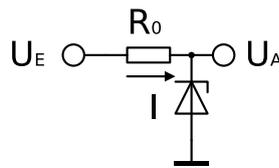


Abbildung 3.2: Schaltung zur Z-Diode

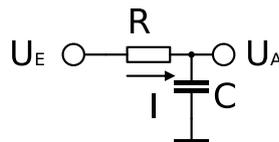


Abbildung 3.3: Schaltung zum Kondensator

- Wiederholen Sie die Messung für  $R_0 = 1\text{k}\Omega$  und  $R_0 = 10\text{k}\Omega$  und stellen Sie alle  $U_A(U_E)$ -Kurven in einem Diagramm dar. Vergleichen Sie die Kurven und diskutieren Sie ihren Verlauf.

### 3.1.3 Der Kondensator

In diesem Versuch werden die Verläufe von Strom und Spannung beim Auf- und Entladen eines Kondensators aufgezeichnet.

- Bauen Sie die Schaltung gemäß Abb. 3.3 auf und wählen Sie  $R$  und  $C$  so, dass die Zeitkonstante  $\tau = RC$  in einem für die Messung sinnvollen Bereich liegt. Legen Sie an  $U_E$  eine Rechteckspannung an, die zwischen  $0\text{V}$  und  $10\text{V}$  wechselt und deren Periode groß gegenüber der Zeitkonstanten  $\tau$  ist. Beachten Sie bei der Wahl der Signalquelle den maximalen Auf- bzw. Entladestrom. Stellen Sie den Verlauf von  $I$ ,  $U_E$  und  $U_A$  grafisch dar. Bestimmen Sie  $\tau$  durch Exponentialfits für das Auf- und Entladen und vergleichen Sie mit der Theorie.

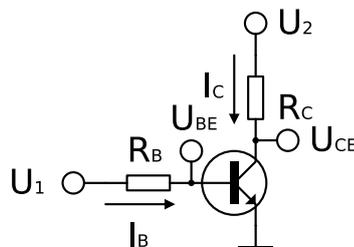


Abbildung 3.4: Schaltung zum Transistor

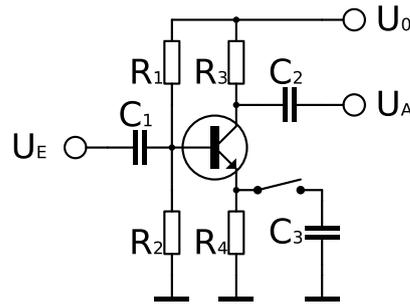


Abbildung 3.5: Schaltbild des Transistorverstärkers

### 3.1.4 Der Transistor

Für die Aufnahme der Transistorkennlinien wird die Grundschaltung aus Abb. 3.4 verwendet. Die Vorwiderstände  $R_C$  und  $R_B$  hängen vom Transistortyp ab und sind so zu wählen, dass die Maximalwerte für Basis- und Kollektorstrom nicht überschritten werden. Beachten Sie dabei, dass der Spannungsabfall über  $R_B$  und  $R_C$  zur Bestimmung der Ströme  $I_B$  und  $I_C$  genutzt wird. Nehmen Sie dann für einen Transistor die folgenden Kennlinien auf:

- *Eingangskennlinie:* Lassen Sie  $U_2$  zunächst unbeschaltet und variieren Sie  $U_1$  so, dass der Basisstrom  $I_B$  den Bereich zwischen 0mA und dem Maximalwert überstreicht. Stellen Sie  $I_B(U_{BE})$  grafisch dar.
- *Stromsteuerkennlinie:* Stellen Sie  $U_2 = 10V$  fest ein und variieren Sie  $U_1$  in einem sinnvollen Bereich. Hier kann eine Anpassung von  $R_B$  hilfreich sein. Stellen Sie  $I_C(I_B)$  grafisch dar und diskutieren Sie den Verlauf der Kennlinie. Bestimmen Sie daraus den Stromverstärkungsfaktor  $\beta$ .
- *Ausgangskennlinien:* Stellen Sie  $U_1$  (und damit  $I_B$ ) auf einen festen Wert ein und variieren Sie  $U_2$ . Stellen Sie  $I_C(U_{CE})$  grafisch dar. Wiederholen Sie diese Messung für fünf verschiedene Werte von  $I_B$  und stellen Sie alle Ausgangskennlinien in einem gemeinsamen Diagramm dar.

## 3.2 Transistorschaltungen

### 3.2.1 Der Transistorverstärker

Aufgabe der hier zu untersuchenden Schaltung ist es, ein Wechselspannungssignal linear, d.h. ohne Verzerrungen zu verstärken. Dafür soll die Eigenschaft des Transistors genutzt werden, Gleichströme linear zu verstärken. Allerdings gilt dies nur für positive Eingangsströme. Um einen Wechselstrom linear zu verstärken, muss man daher einen konstanten Gleichstrom addieren. Dies geschieht in der vorliegenden Schaltung über einen Spannungsteiler, der aus den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  gebildet wird. Dadurch wird der Gleichstromanteil so eingestellt, dass er sich genau in der Mitte des linearen Verstärkungsbereiches befinden, d.h. es werden positive und negative Anteile der Signalwechselspannung gleichermaßen verstärkt. Um eine Gleichstromeinspeisung aus

dem Eingangssignal zu verhindern, wird dieses über den Kondensator  $C_1$  eingekoppelt, der Gleichstromanteile ausfiltert.

Das überlagerte Signal aus Gleich- und Wechselstrom wird der Basis des Transistors zugeführt und linear verstärkt. Durch den Kollektor fließt daher ein verstärkter Strom, der wiederum eine Überlagerung aus Gleich- und Wechselstrom darstellt. Dieser Strom fließt auch durch den Kollektorvorwiderstand  $R_3$  und führt daher zu einem Spannungsabfall, der wieder eine Überlagerung aus Gleich- und Wechselspannung enthält. Bevor dieses Signal dem Ausgang zugeführt wird, wird der Gleichspannungsanteil über den Kondensator  $C_2$  ausgefiltert. Übrig bleibt eine verstärkte Wechselspannung.

In der beschriebenen Form hat die Schaltung den Nachteil, dass sie anfällig auf Temperaturschwankungen reagiert. Durch einen Anstieg der Temperatur des Transistors (z.B. durch die am Transistor abfallende Verlustleistung im Betrieb der Schaltung) steigt seine Leitfähigkeit und damit auch der Kollektorstrom. Das führt zu einem weiteren Anstieg der Verlustleistung und damit auch der Temperatur, wodurch dieser Effekt sich weiter verstärkt. Um dies zu verhindern, muss man einem Anstieg des Kollektorstromes entgegenwirken. Dafür sorgt der Widerstand  $R_4$ . Ein Anstieg des Kollektorstromes und damit auch des Emitterstromes erhöht den Spannungsabfall über  $R_4$ , wodurch die Spannung am Emitter des Transistors steigt. Dadurch sinkt die Spannungsdifferenz zwischen Basis und Emitter, wodurch der Basisstrom und damit auch der Kollektorstrom sinkt. Dadurch wird einem weiteren Anstieg des Kollektorstromes gegengesteuert.

Der Einsatz des Emitterwiderstandes  $R_4$  hat den Nachteil, dass auch einem Anstieg des Kollektorstromes durch das Eingangssignal entgegengesteuert wird. Dadurch wird die Verstärkung verringert. Um dies zu verhindern, wird zusätzlich der Kondensator  $C_3$  eingefügt, über den schnelle Änderungen des Kollektorstromes, wie sie durch das Eingangssignal verursacht werden, abfließen können. Die thermischen Schwankungen des Kollektorstromes dagegen sind langsam und fließen über  $R_4$  ab, wodurch sie eine Gegensteuerung verursachen.

- Bauen Sie die Schaltung gemäß Abb. 3.5 mit den Werten  $C_1 = C_2 = 220\text{nF}$ ,  $R_1 = 22\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 4,7\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 2,2\text{k}\Omega$ ,  $R_4 = 470\Omega$  auf und schließen Sie den Kondensator  $C_3$  zunächst nicht an. Als Versorgungsspannung wählen Sie  $U_0 = 12\text{V}$ . Legen Sie an den Eingang eine Wechselspannung mit  $U_{ESS} = 1\text{V}$  und  $f = 1\text{kHz}$ . Stellen Sie  $U_E$  und  $U_A$  grafisch dar und bestimmen Sie die Verstärkung aus dem Verhältnis der beiden Amplituden sowie die Phasenverschiebung.
- Stellen Sie die Eingangsspannung auf  $U_{ESS} = 40\text{mV}$  und  $f = 1\text{kHz}$  ein und schalten Sie den Kondensator  $C_3 = 47\mu\text{F}$  parallel zu  $R_4$ . Messen Sie erneut Verstärkung und Phasenverschiebung. Vergleichen Sie mit der ersten Messung.

### 3.2.2 Der Schmitt-Trigger

Beim Schmitt-Trigger handelt es sich um einen Schwellwertschalter, der ein analoges Eingangssignal in ein digitales Ausgangssignal umwandelt. Er besitzt zwei Schaltschwellen, eine für steigende und eine für fallende Signalfanken. Seine Kennlinie gleicht daher einer Hysteresekurve.

Betrachtet man zunächst den Fall  $U_E = 0\text{V}$ , so sperrt der Transistor  $T_1$ , da er keine hinreichende Basis-Emitter-Spannung hat. Die Widerstände  $R_{C1}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_E$  bilden einen Spannungsteiler. Durch geschickte Wahl der Widerstandswerte erreicht man es, dass die über  $R_2$  abfallende Spannung ausreicht, um den Transistor  $T_2$  durchzuschalten.

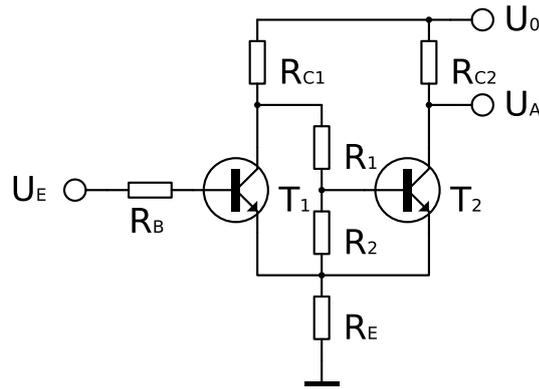


Abbildung 3.6: Schaltbild des Schmitt-Triggers

Es fließt daher ein Strom durch  $R_{C2}$  und  $R_E$ . Wählt man  $R_{C2} \ll R_{C1} + R_1 + R_2$ , so kann man den Strom über  $R_{C1}$  vernachlässigen und erhält für den Strom durch  $R_E$ :

$$I_E = \frac{U_0}{R_{C2} + R_E} \quad (3.2.1)$$

Für die Ausgangsspannung, die zugleich an den Emittern der beiden Transistoren anliegt, ergibt sich damit

$$U_A = U_0 \frac{R_E}{R_{C2} + R_E} \quad (3.2.2)$$

Erhöht man nun die Eingangsspannung  $U_E$ , so ändert sich so lange nichts an dieser Situation, bis die Basis-Emitter-Spannung von  $T_1$  die Diffusionsspannung  $U_D$  überschreitet. Das ist der Fall bei

$$U_E = U_{\text{Ein}} = U_0 \frac{R_E}{R_{C2} + R_E} + U_D \quad (3.2.3)$$

Wenn diese Spannung erreicht ist, schaltet  $T_1$  durch. Dadurch wird der Spannungsteiler aus  $R_1$  und  $R_2$  überbrückt, wodurch  $T_2$  die nötige Basisspannung zum Durchschalten fehlt.  $T_2$  sperrt daher und die Ausgangsspannung steigt auf  $U_A = U_0$ . Auch die Spannung an den Emittern ändert sich, da der Strom nun nicht mehr über  $R_{C2}$ , sondern über  $R_{C1}$  fließt. Damit ändert sich aber auch die Schwellenspannung, die unterschritten werden muss, damit  $T_1$  wieder sperrt. Sie beträgt nun

$$U_E = U_{\text{Aus}} = U_0 \frac{R_E}{R_{C1} + R_E} + U_D \quad (3.2.4)$$

Wählt man  $R_{C1} > R_{C2}$ , so ist  $U_{\text{Aus}} < U_{\text{Ein}}$  und man erhält das gewünschte Hystereseverhalten.

- Bauen Sie die Schaltung gemäß Abb. 3.6 auf und stellen Sie die Versorgungsspannung auf  $U_0 = 10\text{V}$  ein. Legen Sie an den Eingang eine Wechselspannung mit  $U_{\text{ESS}} = 6\text{V}$  an und stellen Sie den Verlauf von  $U_E$  und  $U_A$  grafisch dar.
- Zur Aufnahme der Hysteresekurve variieren Sie  $U_E$  im Bereich von  $0\text{V}$  bis  $5\text{V}$  und stellen Sie  $U_A(U_E)$  sowohl für den Anstieg als auch für den Abfall von  $U_E$  grafisch dar. Bestimmen Sie die Ein- und Ausschaltspannung und vergleichen Sie mit den Theoriewerten.

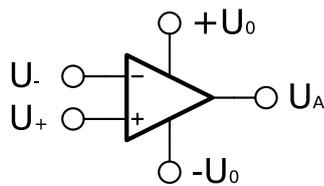


Abbildung 3.7: Symbol des Operationsverstärkers

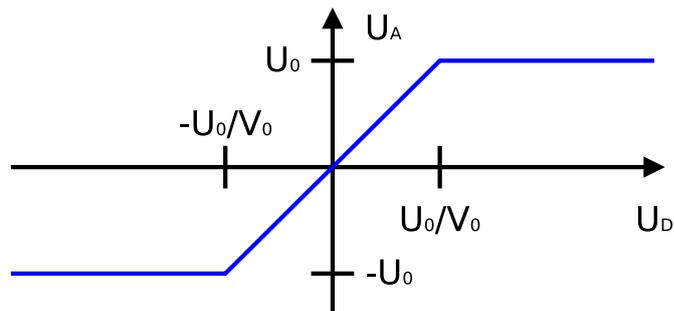


Abbildung 3.8: Kennlinie des Operationsverstärkers

### 3.3 Der Operationsverstärker

#### 3.3.1 Grundlagen

Abb 3.7 zeigt das Schaltbild der Operationsverstärkers. Dieser verfügt im Gegensatz zu anderen Verstärkern über zwei Eingänge, die im Schaltbild mit + und – gekennzeichnet sind. Die Spannung, die verstärkt wird, ist die Spannungsdifferenz zwischen diesen beiden Eingängen,  $U_D = U_+ - U_-$ . Die Ausgangsspannung ergibt sich daher zu  $U_A = V_0 U_D$ , wobei  $V_0$  die Leerlaufverstärkung des Operationsverstärkers ist. Die Leerlaufverstärkung typischer Operationsverstärker liegt im Bereich  $V_0 = 10^5 \dots 10^6$ .

Da die Ausgangsspannung  $U_A$  des Operationsverstärkers durch die Versorgungsspannung  $\pm U_0$  erzeugt wird, ist die durch diese begrenzt. Es ergibt sich daher eine Ausgangsspannung, wie sie in Abb. 3.8 dargestellt ist. Eine lineare Verstärkung findet nur für Differenzspannungen im Bereich  $-\frac{U_0}{V_0} \leq U_D \leq \frac{U_0}{V_0}$  statt. Da in diesem Bereich  $|U_D| \ll |U_0|$  ist, kann man für alle praktischen Berechnungen  $U_D \approx 0$  annehmen.

Eine weitere Eigenschaft des Operationsverstärkers ist sein hoher Eingangswiderstand, der bei typischen Operationsverstärkern im Bereich  $100\text{k}\Omega \dots 1\text{M}\Omega$  liegt. Daher lässt sich der Strom an den Eingängen in der Praxis vernachlässigen. Unter Verwendung dieser Annahmen lassen sich die gängigen Verstärkerschaltungen berechnen, die in diesem Versuchsteil untersucht werden sollen.

#### 3.3.2 Der invertierende Verstärker

Abb. 3.9 zeigt das Schaltbild des invertierenden Operationsverstärkers. Für die Spannung am nichtinvertierenden Eingang gilt  $U_+ = 0\text{V}$ , da dieser mit der Masse verbunden ist. Im linearen Bereich des Verstärkers ist daher auch  $U_- = 0\text{V}$ . Damit lassen sich die

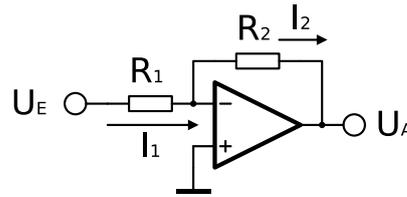


Abbildung 3.9: Schaltbild des invertierenden Verstärkers

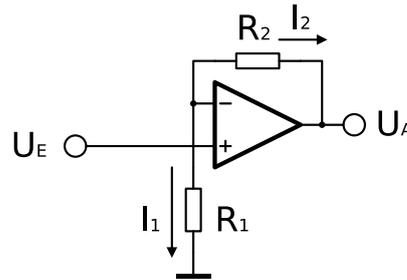


Abbildung 3.10: Schaltbild des nichtinvertierenden Verstärkers

Ströme  $I_1$  und  $I_2$  berechnen. Es gilt  $I_1 = \frac{U_E - U_-}{R_1}$  und  $I_2 = \frac{U_- - U_A}{R_2}$ . Da der Eingangsstrom am invertierenden Eingang  $I_- = 0$  ist, gilt gemäß der Knotenregel  $I_1 = I_2$ . Daraus ergibt sich die Verstärkung

$$U_A = -\frac{R_2}{R_1} U_E \quad \Rightarrow \quad V = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.3.1)$$

- Bauen Sie einen invertierenden Operationsverstärker mit den Werten  $R_1 = 1\text{k}\Omega$  und  $R_2 = 100\text{k}\Omega$  auf. Messen Sie die Ausgangsspannung  $U_A$  als Funktion der Eingangsspannung  $U_E$  über den gesamten linearen Verstärkungsbereich. Als Signalquelle können Sie einen Ausgang der DAQ-Karte verwenden. Denken Sie daran, eine zusätzliche Spannungsquelle zur Versorgung des Operationsverstärkers vorzusehen.
- Wiederholen Sie den Versuch mit  $R_1 = 10\text{k}\Omega$  und tragen Sie die beiden  $U_A(U_E)$ -Kurven in ein gemeinsames Diagramm ein. Bestimmen Sie für beide die Verstärkung durch lineare Regression und vergleichen Sie mit der Theorie.
- Ersetzen Sie das Eingangssignal durch ein Sinussignal mit  $U_{ESS} = 100\text{mV}$  und  $f = 5\text{kHz}$ . Stellen Sie Eingangs- und Ausgangssignal graphisch dar und bestimmen Sie Verstärkung und Phasenverschiebung.

### 3.3.3 Der nichtinvertierende Verstärker

Das Schaltbild des nichtinvertierenden Operationsverstärkers ist in Abb. 3.10 dargestellt. Gegenüber dem invertierenden Verstärker sind die Masse und die Eingangsspannung vertauscht. Am nichtinvertierenden Eingang liegt die Spannung  $U_+ = U_E$  an. Die gleiche Spannung liegt daher auch am invertierenden Eingang an. Daraus ergeben sich

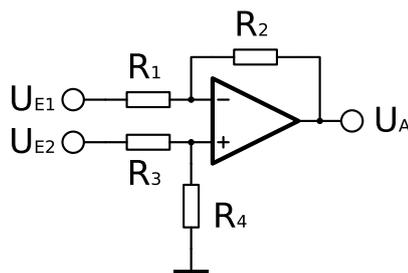


Abbildung 3.11: Schaltbild des Differenzverstärkers

die Ströme  $I_1 = \frac{U_E}{R_1}$  und  $I_2 = \frac{U_E - U_A}{R_2}$ . Aus der Knotenregel erhält man  $I_1 + I_2 = 0$ . Daraus folgt schließlich

$$U_A = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) U_E \quad \Rightarrow \quad V = \frac{R_2}{R_1} + 1 \quad (3.3.2)$$

- Bauen Sie ihre Schaltung aus dem letzten Versuchsteil zum nichtinvertierenden Verstärker um und wiederholen Sie die drei Messungen. Dafür können Sie die gleichen VI's verwenden. Vergleichen Sie die Ergebnisse.

### 3.3.4 Der Differenzverstärker

Beim Differenzverstärker handelt es sich um eine Kombination aus invertierendem und nichtinvertierendem Verstärker. Genau wie der unbeschaltete Operationsverstärker hat er zwei Eingänge, einen invertierenden und einen nichtinvertierenden. Über den Spannungsteiler, der durch  $R_3$  und  $R_4$  gebildet wird, erhält man für die Spannung am nichtinvertierenden Eingang des OPs

$$U_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{E2} \quad (3.3.3)$$

Die gleiche Spannung  $U_+ = U_-$  liegt auch am invertierenden Eingang an. Aus dieser folgt der Strom durch  $R_1$ :

$$I_1 = \frac{U_{E1} - U_-}{R_1} = \frac{1}{R_1} \left( U_{E1} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{E2} \right) \quad (3.3.4)$$

Gemäß der Knotenregel fließt der gleiche Strom  $I_1 = I_2$  durch  $R_2$ . Über den Spannungsabfall an  $R_2$  erhält man die Ausgangsspannung

$$\begin{aligned} U_A &= U_- - I_2 R_2 \\ &= \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{E2} - \frac{R_2}{R_1} \left( U_{E1} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{E2} \right) \\ &= \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{E2} - \frac{R_2}{R_1} U_{E1} \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

Wählt man  $R_1 = R_3$  und  $R_2 = R_4$ , so ergibt sich

$$U_A = \frac{R_2}{R_1} (U_{E2} - U_{E1}) \quad (3.3.6)$$

Die Differenzspannung wird also um den Faktor  $V = \frac{R_2}{R_1}$  verstärkt.

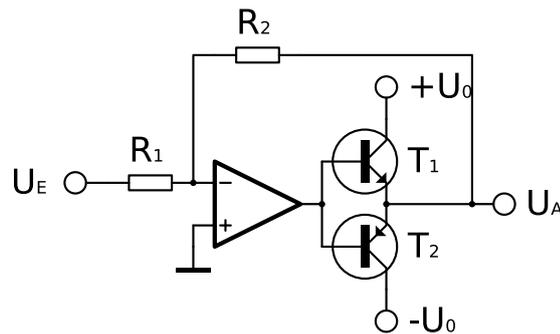


Abbildung 3.12: Schaltbild des invertierenden Leistungsverstärkers

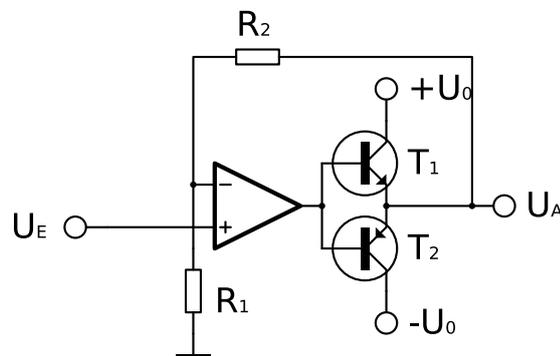


Abbildung 3.13: Schaltbild des nichtinvertierenden Leistungsverstärkers

- Bauen Sie den Differenzverstärker mit den Werten  $R_1 = R_3 = 10\text{k}\Omega$  und  $R_2 = R_4 = 100\text{k}\Omega$  auf. Stellen Sie die Ausgangsspannung  $U_A$  als Funktion der Differenzspannung  $U_{E2} - U_{E1}$  dar. Wählen Sie dafür eine der beiden Eingangsspannungen konstant und variieren Sie die andere. Wiederholen Sie die Messung für drei verschiedene Werte der konstanten Eingangsspannung. Bestimmen Sie die Verstärkung durch lineare Regression und vergleichen Sie mit dem Theoriewert.

### 3.3.5 Der Leistungsverstärker

Bei den bisher genannten Verstärkerschaltungen wird der gesamte Ausgangsstrom vom Operationsverstärker geliefert. Es gibt jedoch Anwendungen, bei denen höhere Ausgangsströme notwendig sind. In diesem Fall lässt sich eine Gegentakt-Endstufe verwenden, die aus zwei Transistoren besteht. Abb. 3.12 und 3.13 zeigen das Schaltbild im Falle des invertierenden bzw. nichtinvertierenden Operationsverstärkers. Die Berechnung der Verstärkung erfolgt genau wie ohne die Gegentakt-Endstufe.

### 3.3.6 Der Impedanzwandler

Das Schaltbild ähnelt dem des nichtinvertierenden Verstärkers mit den Werten  $R_1 \rightarrow \infty$  und  $R_2 \rightarrow 0$ . Man erwartet daher für diesen “Verstärker” eine Verstärkung von  $V = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1$ , d.h.  $U_A = U_E$ . Warum kann eine solche Schaltung dennoch sinnvoll sein?

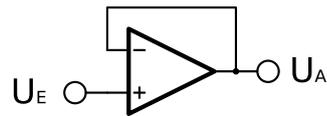


Abbildung 3.14: Schaltbild des Impedanzwandlers

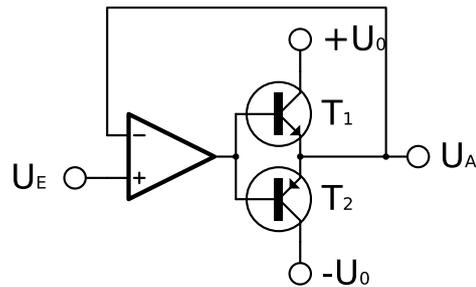


Abbildung 3.15: Schaltbild des Leistungsimpedanzwandlers

(Hinweis: Betrachten Sie die Stromstärken  $I_E$  und  $I_A$  am Eingang und Ausgang der Schaltung.) Auch beim Impedanzwandler kann der Ausgangsstrom durch eine nachgeschaltete Transistorendstufe gesteigert werden.

- Bauen Sie den Impedanzwandler gemäß Abb. 3.14 auf und stellen Sie  $U_A$  als Funktion von  $U_E$  im Bereich von  $-10\text{V}$  bis  $10\text{V}$  grafisch dar.

# Kapitel 4

## Wahlversuche

Die Wahlversuche dienen der Vertiefung und Anwendung der in den Pflichtversuchen erlernten Grundlagen.

### 4.1 Die Solarzelle

Ziel des Solarzellenversuches ist es, die Maximalleistung einer oder mehrerer Solarzellen in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren (Lichtintensität, Wellenlänge des Lichtes, Temperatur, Solarzellentyp) zu untersuchen und so die charakteristischen Eigenschaften von Solarzellen aus verschiedenen Halbleitermaterialien kennenzulernen.

#### 4.1.1 Versuchsaufbau

Abb. 4.1 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus. Die Solarzelle befindet sich auf einem höhenverstellbaren Tisch, um den Abstand zur Lichtquelle variieren zu können. Dieser Tisch wird von unten über einen Peltierkühler gekühlt. Über einen Thermostaten wird die Temperatur konstant gehalten. Zur besseren Wärmeableitung sind die im Versuch benutzten Solarzellen auf Kupferplatten montiert.

Als Lichtquelle dient eine Xenon-Hochdrucklampe. Zur Untersuchung der spektralen Empfindlichkeit der Solarzellen können Spektralfilter zwischen Lampe und Solarzelle montiert werden.

#### 4.1.2 Messelektronik

Aufgabe der Messelektronik ist es, die maximale Leistung der Solarzelle, also die Leistung bei optimalem Lastwiderstand zu bestimmen. Dafür wird eine Messelektronik benötigt, mit der sich der Lastwiderstand kontinuierlich verändern lässt, wobei Strom und Spannung der Solarzelle gemessen werden. Aus diesen Werten lässt sich die Leistung berechnen. Darüber hinaus muss die kleine Spannung der Solarzelle (typischerweise  $< 1\text{V}$ ) verstärkt werden, um sie mit der Messkarte in hoher Auflösung messen zu können. Eine Schaltung, die diese Aufgaben erfüllt, ist in Abb. 4.2 dargestellt.

Bei der Schaltung handelt es sich um zwei invertierende Operationsverstärker, wobei der Widerstand  $R_3$  variabel ist. Zu beachten ist die Polung der Solarzelle, durch die am Eingang die Spannung  $-U$  anliegt. Entsprechend sei der Eingangsstrom mit  $-I$  bezeichnet.

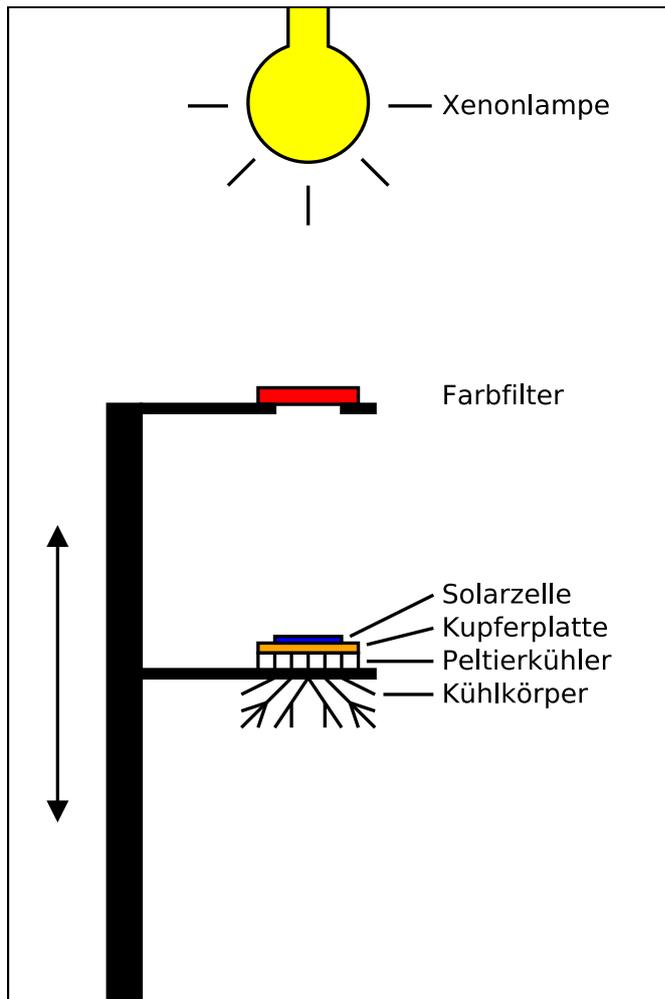


Abbildung 4.1: Aufbau des Solarzellenversuches

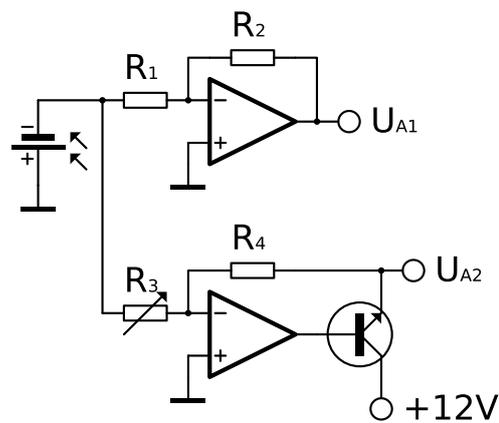


Abbildung 4.2: Schaltbild des Solarzellenverstärkers

Der erste OP dient der Spannungsmessung. Gemäß der Formel für die Verstärkung eines invertierenden OPs ergibt sich

$$U_{A1} = -\frac{R_2}{R_1}(-U) = \frac{R_2}{R_1}U \quad (4.1.1)$$

Der zweite OP dient der Strommessung. Nach der Knotenregel teilt sich der Strom  $I$  der Solarzelle auf die beiden Ströme durch die Widerstände  $R_1$  und  $R_3$  (und damit auch  $R_2$  und  $R_4$ ) auf. Es gilt also

$$I = I_1 + I_3 = I_2 + I_4 = \frac{U_{A1}}{R_2} + \frac{U_{A2}}{R_4} \quad (4.1.2)$$

Durch Messen von  $U_{A1}$  und  $U_{A2}$  lassen sich somit Strom und Spannung der Solarzelle bestimmen und daraus die Leistung  $P = UI$  berechnen. Zugleich dient die Schaltung als regelbarer Lastwiderstand. Die beiden nichtinvertierenden Eingänge der OPs sind auf Masse gelegt, an ihnen liegt daher die Spannung 0V an. Folglich liegt auch den invertierenden Eingängen eine Spannung von 0V. Effektiv verhält sich der Eingang der Schaltung daher, als wären die beiden Widerstände  $R_1$  und  $R_3$  parallel gegen Masse geschaltet. Das entspricht einem Lastwiderstand

$$R = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \quad (4.1.3)$$

Durch Verändern von  $R_3$  lässt sich somit der Lastwiderstand ändern. Berücksichtigt man, dass  $U = R_1 I_1 = R_3 I_3$  ist, so ergibt sich

$$R = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{\frac{U}{I_1} \frac{U}{I_3}}{\frac{U}{I_1} + \frac{U}{I_3}} = \frac{U}{I_1 + I_3} = \frac{U}{I} \quad (4.1.4)$$

Damit lässt sich auch der Lastwiderstand aus den gemessenen Werten berechnen. Da der von der Solarzelle gelieferte Strom zu groß ist, um komplett über die beiden OPs abzufließen, dient ein Transistor als Stromverstärker. Hier ist zu beachten, dass man einen Transistortyp auswählt, der einen hohen Kollektorstrom (typischerweise  $\geq 200\text{mA}$ ) verträgt.

### 4.1.3 Durchführung

- Bauen Sie zunächst den Messverstärker aus dem vorherigen Abschnitt auf und verwenden Sie die Werte  $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 100\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 0 \dots 1\text{k}\Omega$  und  $R_4 = 100\Omega$ . Diese sind für die meisten Solarzellen geeignet. Je nach Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom können jedoch Anpassungen erforderlich sein.
- Zur Inbetriebnahme des Versuchsaufbaus stecken Sie zunächst den Netzstecker ein. Der Lüfter, der die Xenonlampe kühlt, beginnt zu laufen. Schalten Sie als nächstes die Xenonlampe am zugehörigen Hochspannungsnetzteil ein. Als letztes schalten Sie den Thermostat sowie das Netzteil für das Peltier-Element (ganz unten) ein. Beim Abschalten gehen Sie in der umgekehrten Reihenfolge vor. Lassen Sie das Netzkabel nach dem Abschalten der Xenonlampe min. 30 Minuten eingesteckt, um für eine ausreichende Abkühlung der Lampe zu sorgen.

- Um eine Messung an einer Solarzelle durchführen zu können, müssen Sie zunächst feststellen, an welchen Punkten die Photospannung abgegriffen werden kann. Legen Sie dazu eine (auf eine Kupferplatte montierte) Solarzelle unter eine Lichtquelle und messen Sie mit einem Multimeter und Prüfspitzen die Spannung zwischen den einzelnen Kontaktpunkten. Die Punkte mit der höchsten Spannungsdifferenz sind im weiteren Versuch zu verwenden.
- Fahren Sie die Kontakte am Solarzellenhalter nach oben und legen Sie die Solarzelle in die Halterung. Bewegen Sie anschließend die Kontaktspitzen mittels der Stellschrauben über die Kontaktpunkte und senken Sie sie mit den Rändelrädern ab. Die Solarzelle ist nun kontaktiert und kann für eine Messung verwendet werden.
- Verbinden Sie die Solarzelle mit dem Eingang des Messverstärkers. Variieren Sie den Widerstand  $R_3$  zwischen  $0\Omega$  und dem Maximalwert und messen Sie währenddessen die Spannungen  $U_{A1}$  und  $U_{A2}$ . Tragen Sie in zwei Diagramme  $I(U)$  und  $P(R)$  auf. Bestimmen Sie die maximale Leistung  $P_{\max}$  sowie den zugehörigen Widerstandswert  $R_{\max}$ .

Sie können nun verschiedene Parameter variieren und die Auswirkungen auf die Maximalleistung untersuchen:

- *Solarzellentyp*: Es stehen u.a. monokristalline und polykristalline Siliziumzellen, Germaniumzellen, Galliumarsenidzellen sowie weitere Halbleitermaterialien zur Verfügung. Beachten Sie, dass die Fläche der Solarzellen sich unterscheidet und berücksichtigen Sie dies beim Vergleich der Maximalleistungen.
- *Abstand zur Lichtquelle*: Der Solarzellenhalter kann an einer Schiene auf und ab geschoben werden. Um dies zu erleichtern, ist er mit einem Seilzug und einem Gegengewicht versehen. Halten Sie ihn gut fest und lösen Sie die Feststellschraube. Bringen Sie ihn dann in die neue Position und stellen Sie die Schraube fest. An einer Skala kann die Abstandänderung abgelesen werden, jedoch nicht der absolute Abstand zur Lampe. Dieser muss durch einen Kurvenfit bestimmt werden.
- *Spektrum*: Über dem Halter für die Solarzelle befindet sich ein weiterer Halter, in den Spektralfilter eingelegt werden können, die einen Teil des Spektrums der Xenonlampe ausblenden. Dabei handelt es sich um sog. Kantenfilter, die den kurzwelligeren Anteil des Spektrums ab einer bestimmten Grenzwellenlänge abschneiden und nur den langwelligeren Anteil passieren lassen.
- *Temperatur*: Über den Thermostaten und ein Peltier-Element lässt sich die Temperatur der Solarzelle verändern.

Achten Sie bei allen Messungen darauf, dass möglichst wenig Streulicht auf die Solarzelle fällt, da dieses die Messergebnisse verfälschen kann.

## 4.2 Das Doppelpendel

Beim Doppelpendelversuch wird die Bewegung zweier mathematischer Pendel, die über eine Feder gekoppelt sind, über Positionssensoren erfasst und mit LabVIEW ausgewertet. Dabei lässt sich die Theorie der (gedämpften) gekoppelten Schwingungen im Experiment überprüfen.

### 4.2.1 Theorie

Das Doppelpendel besteht aus zwei mathematischen Pendeln der Masse  $m$ , die an Stangen der Länge  $l$  aufgehängt sind. Ihr Auslenkungswinkel sei mit  $\phi_1$  bzw.  $\phi_2$  bezeichnet. Es gelten Bewegungsgleichungen des mathematischen Pendels:

$$ml\ddot{\phi}_1 = -mg \sin \phi_1 \quad (4.2.1a)$$

$$ml\ddot{\phi}_2 = -mg \sin \phi_2 \quad (4.2.1b)$$

Koppelt man nun beide mit einer Feder der Federkonstanten  $D$ , die sich im Abstand  $r$  vom Aufhängungspunkt befindet, so erhält man

$$ml\ddot{\phi}_1 = -mg \sin \phi_1 - Dr(\phi_1 - \phi_2) \quad (4.2.2a)$$

$$ml\ddot{\phi}_2 = -mg \sin \phi_2 - Dr(\phi_2 - \phi_1) \quad (4.2.2b)$$

Da das Pendel durch die Luftreibung gedämpft wird, wirkt noch eine geschwindigkeitsabhängige Reibungskraft und es gilt

$$ml\ddot{\phi}_1 = -mg \sin \phi_1 - Dr(\phi_1 - \phi_2) - k\dot{\phi}_1 \quad (4.2.3a)$$

$$ml\ddot{\phi}_2 = -mg \sin \phi_2 - Dr(\phi_2 - \phi_1) - k\dot{\phi}_2 \quad (4.2.3b)$$

Für kleine Winkel gilt näherungsweise  $\sin \phi \approx \phi$  und man erhält schließlich

$$ml\ddot{\phi}_1 = -mg\phi_1 - Dr(\phi_1 - \phi_2) - k\dot{\phi}_1 \quad (4.2.4a)$$

$$ml\ddot{\phi}_2 = -mg\phi_2 - Dr(\phi_2 - \phi_1) - k\dot{\phi}_2 \quad (4.2.4b)$$

Um diese Gleichungen zu lösen, muss man sie zunächst entkoppeln. Dafür bildet man die Winkel  $\phi_+ = \phi_1 + \phi_2$  und  $\phi_- = \phi_1 - \phi_2$  und berechnet ihre Bewegungsgleichungen durch Addition bzw. Subtraktion der ursprünglichen Gleichungen. Daraus erhält man die entkoppelten Gleichungen:

$$ml\ddot{\phi}_+ = -mg\phi_+ - k\dot{\phi}_+ \quad (4.2.5a)$$

$$ml\ddot{\phi}_- = -(mg + 2Dr)\phi_- - k\dot{\phi}_- \quad (4.2.5b)$$

Dies sind die Bewegungsgleichungen zweier gedämpfter, harmonischer Oszillatoren. Die Lösungen sind bekannt und lauten (im Fall kleiner Dämpfung)

$$\phi_+(t) = \left( \phi_+(0) \cos(\omega_+ t) + \frac{\dot{\phi}_+(0) + \delta \phi_+(0)}{\omega_+} \sin(\omega_+ t) \right) \exp(-\delta t) \quad (4.2.6a)$$

$$\phi_-(t) = \left( \phi_-(0) \cos(\omega_- t) + \frac{\dot{\phi}_-(0) + \delta \phi_-(0)}{\omega_-} \sin(\omega_- t) \right) \exp(-\delta t) \quad (4.2.6b)$$

mit

$$\omega_+ = \sqrt{\frac{g}{l} - \frac{k^2}{4m^2 l^2}} \quad (4.2.7a)$$

$$\omega_- = \sqrt{\frac{g}{l} + 2\frac{Dr}{ml} - \frac{k^2}{4m^2 l^2}} \quad (4.2.7b)$$

$$\delta = \frac{k}{2ml} \quad (4.2.7c)$$

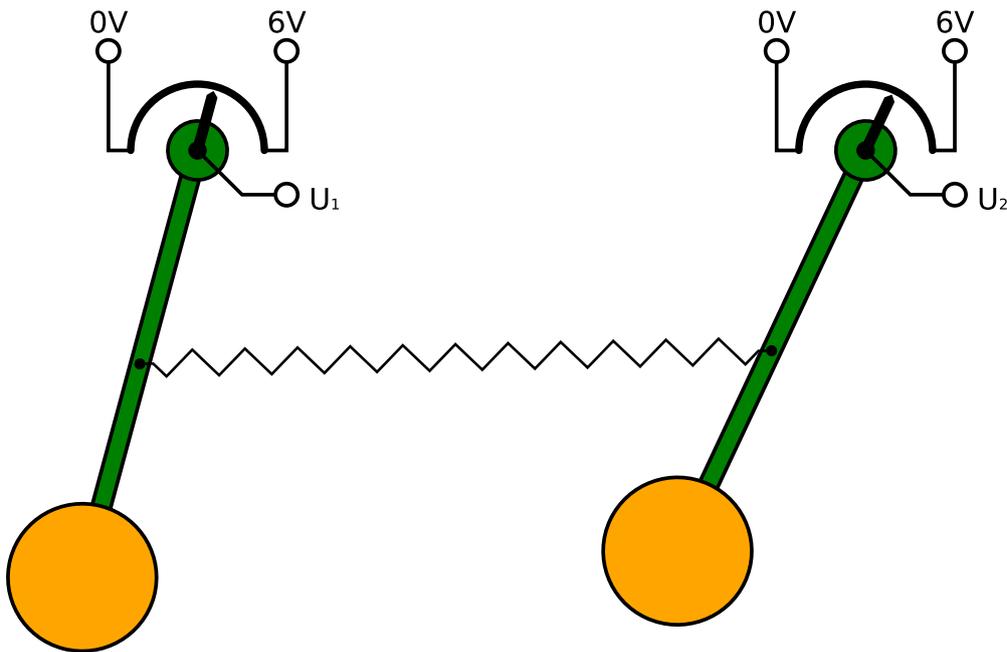


Abbildung 4.3: Versuchsaufbau zum Doppelpendel

Wenn die Masse  $m$ , die Fallbeschleunigung  $g$  und der Abstand  $r$  der Feder vom Aufhängepunkt bekannt sind, lassen sich die anderen Parameter durch Messung der Schwingungen berechnen. Die Pendellänge erhält man aus

$$l = \frac{g}{\omega_+^2 + \delta^2} \quad (4.2.8)$$

Daraus folgt die Dämpfung zu

$$k = 2ml\delta \quad (4.2.9)$$

Die Federkonstante erhält man schließlich aus

$$D = \frac{ml}{2r} (\omega_-^2 - \omega_+^2) \quad (4.2.10)$$

### 4.2.2 Versuchsablauf

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4.3 skizziert. Um die Auslenkung der beiden Pendel zu messen, sind diese mit einem Potentiometer verbunden, das als positionsabhängiger Spannungsteiler funktioniert. Auf diese Weise wird die Auslenkung der Pendel in einen Spannungswert umgesetzt, der mittels der DAQ-Karte gemessen werden kann. Der Spannungswert, der der Ruhelage der beiden Pendel entspricht, ist vom jeweiligen Messwert abzuziehen.

- Versetzen Sie das Pendel in Schwingung und zeichnen Sie seine Bewegung mit einem LabVIEW-Programm auf. Stellen Sie  $\phi_1(t)$  und  $\phi_2(t)$  (bzw.  $U_1(t)$  und  $U_2(t)$ ) in einem Diagramm sowie  $\phi_+(t)$  und  $\phi_-(t)$  in einem weiteren Diagramm grafisch

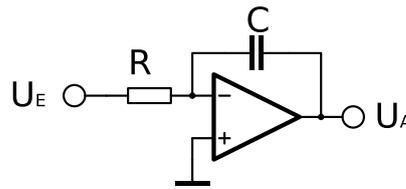


Abbildung 4.4: Schaltbild des Integrierers

dar. Diskutieren Sie den Verlauf der Kurven für unterschiedliche Anfangsbedingungen.

- Bestimmen Sie aus der Kurve für  $\phi_+(t)$  durch einen Kurvenfit die Parameter  $\omega_+$  und  $\delta$ . Bestimmen Sie  $m$  durch Wägung der beiden Pendelkörper. Berechnen Sie daraus die Pendellänge  $l$  und die Dämpfung  $k$ .
- Variieren Sie den Abstand  $r$  der Feder vom Aufhängungspunkt der beiden Pendel. Achten Sie dabei darauf, dass die Höhe der Feder bei beiden Pendelkörpern gleich ist. Zeichnen Sie die Bewegung für verschiedene Abstände  $r$  auf und bestimmen Sie jeweils  $\omega_-$  durch einen Kurvenfit an  $\phi_-(t)$ . Tragen Sie

$$\frac{ml}{2} (\omega_-^2 - \omega_+^2) = Dr \quad (4.2.11)$$

als Funktion von  $r$  in ein Diagramm ein und bestimmen Sie  $D$  durch lineare Regression.

- Schreiben Sie ein VI, das die Bewegung eines Doppelpendels mit bekannten Parametern und Anfangsbedingungen simuliert. Stellen Sie die simulierte Bewegung grafisch dar.
- Fügen Sie Ihr Simulations-VI als Sub-VI in Ihr Messprogramm ein und stellen Sie die gemessenen und simulierten Kurven in einem gemeinsamen Diagramm dar. Vergleichen Sie die gemessenen Kurven mit Ihrer Simulation.

## 4.3 Der Operationsverstärker

Im Rahmen dieses Versuches werden weitere Schaltungen mit dem Operationsverstärker aufgebaut und so die Eigenschaften eines wichtigen und gebräuchlichen Bauteils der Elektronik näher untersucht. Es müssen nicht alle Versuche durchgeführt werden - allerdings ist es zum Verständnis der einzelnen Schaltungen sinnvoll, in der genannten Reihenfolge vorzugehen.

### 4.3.1 Der Integrierer

Die Schaltung ähnelt von ihrem Aufbau her dem invertierenden Verstärker, wobei der Widerstand  $R_2$  durch einen Kondensator ersetzt wird. Wie beim Verstärker kann man für die Spannungen an den Eingängen des OPs  $U_- = U_+ = 0$  annehmen. Bei der Berechnung der Ausgangsspannung ist zu berücksichtigen, dass die Spannung am Kondensator zeitabhängig ist. Das Vorzeichen der Ladung  $Q$  des Kondensators sei so gewählt, dass

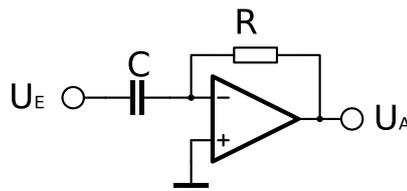


Abbildung 4.5: Schaltbild des Differenzierers

$Q = CU_A$  ist. Dann ist der Ladestrom  $\dot{Q} = -I_E = -\frac{U_E}{R}$ . Durch Integrieren folgt daraus die Ausgangsspannung

$$U_A(t) = U_A(t_0) - \frac{1}{RC} \int_{t_0}^t U_E(\tilde{t}) d\tilde{t} \quad (4.3.1)$$

Die Ausgangsspannung ist also proportional zum zeitlichen Integral über der Eingangsspannung.

Bauen Sie die Schaltung mit  $R = 10\text{k}\Omega$  auf und wählen Sie  $C$  so, dass die Ausgangsspannung  $U_A$  innerhalb Ihres Messzeitraumes im Bereich von  $-10\text{V}$  bis  $10\text{V}$  bleibt. Stellen Sie  $U_E(t)$  und  $U_A(t)$  in einem gemeinsamen Graphen dar und verwenden Sie dabei verschiedene Arten von Eingangssignalen (Gleichspannung, Sinus, Dreieck und Rechteck). Alternativ lässt sich mit dem Analogausgang der Messkarte eine stufenförmige Spannung realisieren und als Eingangsspannung des Integrierers verwenden. Dafür ist  $U_E$  laufend über ein Update Channel VI (innerhalb einer While-Schleife mit Zeitverzögerung) zu aktualisieren und in der gleichen Schleife  $U_A$  über ein Sample Channel VI zu messen. So lassen sich beliebige zeitabhängige Spannungen erzeugen und integrieren.

### 4.3.2 Der Differenzierer

Beim Differenzierer sind gegenüber dem Integrierer der Widerstand und der Kondensator vertauscht. Es liegt daher nahe zu vermuten, dass diese Schaltung die umgekehrte Operation ausführt und das Eingangssignal nach der Zeit ableitet. Für die Berechnung von  $U_A$  setzt man wieder  $U_- = U_+ = 0$ . Das Vorzeichen der Ladung  $Q$  des Kondensators sei so gewählt, dass  $Q = CU_E$  ist. Für den Ladestrom gilt dann  $\dot{Q} = -\frac{U_A}{R}$ . Daraus erhält man

$$U_A(t) = -RC \frac{dU_E(t)}{dt} \quad (4.3.2)$$

Die Ausgangsspannung ist also proportional zur zeitlichen Änderung der Eingangsspannung.

Bauen Sie die Schaltung mit  $R = 10\text{k}\Omega$  auf und wählen Sie  $C$  so, dass die Ausgangsspannung  $U_A$  bei den auftretenden Werten für  $U_E$  im Bereich von  $-10\text{V}$  bis  $10\text{V}$  bleibt. Stellen Sie  $U_E(t)$  und  $U_A(t)$  in einem gemeinsamen Graphen dar und verwenden Sie dabei verschiedene Arten von Eingangssignalen (Gleichspannung, Sinus, Dreieck und Rechteck).

Warum ist eine von der Messkarte erzeugte (stufenförmige) Spannung als Eingangssignal für den Differenzierer nicht so gut geeignet wie für den Integrierer?

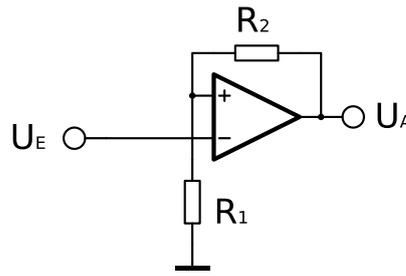


Abbildung 4.6: Schaltbild des invertierenden Schmitt-Triggers

### 4.3.3 Der Komparator

In allen bisherigen Schaltungen wurde der Operationsverstärker im linearen Bereich der Kennlinie betrieben, in dem  $|U_D| \ll |U_A| < U_0$  ist und daher für alle Berechnungen  $U_D \approx 0$  angenommen werden durfte. Eine Schaltung, in der dies nicht mehr gilt, ist der Komparator. Sie dient dazu, zwei Spannungen, die an den beiden Eingängen anliegen, zu vergleichen. Die Eingangsspannungen werden dabei direkt mit den beiden Eingängen des Operationsverstärkers verbunden. Für diese Schaltung gilt näherungsweise  $U_A = U_0 \operatorname{sign} U_D$ .

Stellen Sie  $U_A$  als Funktion von  $U_+$  für 5 verschiedene Werte von  $U_-$  grafisch dar und überprüfen Sie damit das genannte Verhalten des Komparators.

### 4.3.4 Der Schmitt-Trigger

Eine Schaltung, in der der Operationsverstärker als Komparator eingesetzt wird, ist der Schmitt-Trigger. Wie beim Verstärker unterscheidet man zwischen einer invertierenden und einer nichtinvertierenden Schaltung. Beim Vergleich mit dem Verstärker fällt jedoch auf, dass die beiden Eingänge des OPs vertauscht sind. Der Ausgang ist über einen Widerstand mit dem nichtinvertierenden Eingang verbunden. Diese Schaltung wird als Mitkopplung bezeichnet.

Zunächst sei der invertierende Schmitt-Trigger betrachtet, der in Abb. 4.6 dargestellt ist. Für die Spannung  $U_+$  am nichtinvertierenden Eingang gilt  $U_+ = \frac{R_1}{R_1+R_2} U_A$ . Da die Ausgangsspannung durch die Versorgungsspannung begrenzt ist, also  $-U_0 < U_A < U_0$ , folgt daraus

$$-\frac{R_1}{R_1+R_2} U_0 < U_+ < \frac{R_1}{R_1+R_2} U_0 \quad (4.3.3)$$

Legt man an den Eingang eine Spannung  $U_E = U_- = -U_0$  an, so ist  $U_- < U_+$  und daher  $U_A = U_0$ . In diesem Fall ist  $U_+ = \frac{R_1}{R_1+R_2} U_0$ . Erhöht man nun die Eingangsspannung, so bleibt dieser Zustand erhalten, bis  $U_- = U_+$  ist. Dann kippt die Schaltung in den Zustand  $U_A = -U_0$ . In diesem Fall ist  $U_+ = -\frac{R_1}{R_1+R_2} U_0$  und somit  $U_+ < U_-$ . Dieser Zustand bleibt so lange erhalten, bis  $U_-$  so weit abgesunken ist, dass wieder  $U_- = U_+$  ist und die Schaltung in den Ausgangszustand zurückkippt.

Etwas anders sind die Vorgänge beim nichtinvertierenden Schmitt-Trigger, der in Abb. 4.7 dargestellt ist. Hier ist  $U_- = 0\text{V}$  konstant. Die Spannung am Eingang  $U_+$  ergibt sich aus dem durch  $R_1$  und  $R_2$  gebildeten Spannungsteiler zu  $U_+ = \frac{U_A R_1 + U_E R_2}{R_1 + R_2}$ . Durch die Begrenzung der Ausgangsspannung durch die Versorgungsspannung ergibt sich in

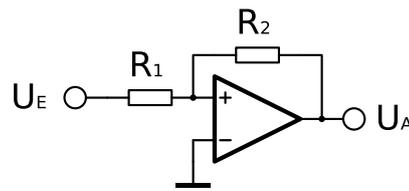


Abbildung 4.7: Schaltbild des nichtinvertierenden Schmitt-Triggers

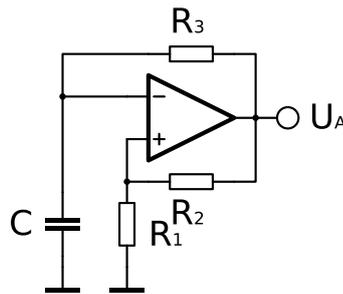


Abbildung 4.8: Schaltbild der astabilen Kippstufe

diesem Fall

$$\frac{-U_0 R_1 + U_E R_2}{R_1 + R_2} < U_+ < \frac{U_0 R_1 + U_E R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.3.4)$$

Wählt man nun  $R_2 > R_1$  und legt an den Eingang eine Spannung  $U_E = -U_0$  an, so ergibt dies

$$\frac{-U_0(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2} < U_+ < \frac{U_0(R_1 - R_2)}{R_1 + R_2} < 0V = U_- \quad (4.3.5)$$

Folglich schaltet der OP seinen Ausgang auf  $U_A = -U_0$ . Erhöht man die Eingangsspannung  $U_E$ , so kippt die Schaltung, wenn  $U_+ = U_- = 0V$  erreicht ist. Dies ist der Fall bei

$$0V = U_+ = \frac{-U_0 R_1 + U_E R_2}{R_1 + R_2} \Leftrightarrow U_E = U_0 \frac{R_1}{R_2} \quad (4.3.6)$$

Der OP schaltet seinen Ausgang dann auf  $U_A = U_0$ . Durch eine analoge Betrachtung ergibt sich der untere Schaltschwellenwert zu  $U_E = -U_0 \frac{R_1}{R_2}$ .

Bauen Sie nacheinander den invertierenden und den nichtinvertierenden Schmitt-Trigger auf. Verwenden Sie dabei die Widerstandswerte  $R_1 = 10k\Omega$  und  $R_2 = 22k\Omega$ . Legen Sie an den Eingang eine variable Spannung im Bereich von  $-10V$  bis  $+10V$  an. Tragen Sie  $U_A$  als Funktion von  $U_E$  in einem Diagramm auf. Bestimmen Sie aus dem Diagramm die Umschaltunkte beider Schaltungen und vergleichen Sie sie mit den Theoriewerten.

### 4.3.5 Die astabile Kippstufe

Die astabile Kippstufe ähnelt in ihrem Aufbau einem invertierenden Schmitt-Trigger, wobei das Eingangssignal die Spannung über einem Kondensator ist, der über den Widerstand  $R_3$  mit der Ausgangsspannung des OPs geladen bzw. entladen wird. Ist die Spannung am Kondensator kleiner als die Schaltschwelle, so ist die Ausgangsspannung  $U_A = +U_0$  und der Kondensator wird geladen. Das geschieht so lange, bis die Spannung

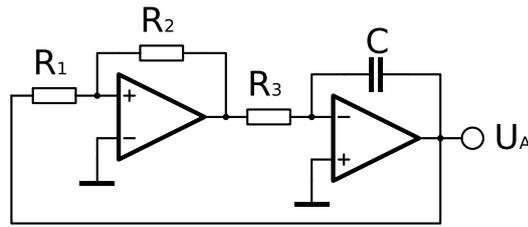


Abbildung 4.9: Schaltbild des Sägezahngenerators

am Kondensator die obere Schaltschwelle des Schmitt-Triggers erreicht und er schaltet. Dann ist die Ausgangsspannung  $U_A = -U_0$  und der Kondensator wird entladen, bis die untere Schaltschwelle erreicht ist. Der Vorgang wiederholt sich periodisch. Da es keinen stabilen Zustand gibt, nennt man die Schaltung astabil.

Bauen Sie eine astabile Kippstufe nach Abb. 4.8 mit den Werten  $R_1 = R_3 = 10\text{k}\Omega$  und  $R_2 = 22\text{k}\Omega$  auf. Verwenden Sie für den Kondensator  $C$  verschiedene Werte im Bereich von  $1\mu\text{F}$  bis  $1000\mu\text{F}$ . Messen Sie sowohl die Ausgangsspannung  $U_A$  als auch die Spannung  $U_C$  am Kondensator und tragen Sie beide synchron über der Zeit auf. Vergleichen Sie die Spannung  $U_C$  beim Kippen der Ausgangsspannung mit den Schaltpunkten, die Sie vom invertierenden Schmitt-Trigger kennen. Bestimmen Sie die Zeitkonstante  $\tau$  durch einen Exponentialfit an die Lade- und Entladekurven des Kondensators und vergleichen Sie mit dem Theoriewert  $\tau = R_3C$ . Berechnen Sie die Periodendauer aus der Zeitkonstanten und den beiden Umschaltpunkten und vergleichen Sie mit der gemessenen Periodendauer.

### 4.3.6 Der Sägezahn-Generator

Der Sägezahngenerator stellt eine Kombination aus einem (invertierenden) Integrierer und einem nichtinvertierenden Schmitt-Trigger dar und ist in seiner Funktionsweise ähnlich der astabilen Kippstufe. Statt mit der Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers einen Kondensator zu laden, wird die Spannung einem Integrierer zugeführt und (mit negativem Vorzeichen) integriert. Wenn die Eingangsspannung am Schmitt-Trigger kleiner ist als die Schaltschwelle, ist seine Ausgangsspannung  $-U_0$ . Die Ausgangsspannung des Integrierers steigt dann linear an, bis die obere Schaltschwelle des Schmitt-Triggers erreicht ist und sein Ausgang auf  $+U_0$  geschaltet wird. Dann fällt die Ausgangsspannung des Integrierers linear ab, bis die untere Schaltschwelle des Schmitt-Triggers erreicht ist und sich der Vorgang wiederholt.

Zusätzlich zur rechteckförmigen Spannung am Ausgang des Schmitt-Triggers erzeugt diese Schaltung ein Signal mit abwechselnd linear steigenden und fallenden Flanken am Ausgang des Integrierers. Dieses Signal wird seiner Form wegen als Sägezahnspannung bezeichnet. Sind beide Steigungen entgegengesetzt gleich groß, so bezeichnet man es auch als Dreieckspannung.

Bauen Sie den Sägezahngenerator gemäß Abb. 4.9 mit den Werten  $R_1 = R_3 = 10\text{k}\Omega$  und  $R_2 = 22\text{k}\Omega$  auf. Verwenden Sie für den Kondensator  $C$  verschiedene Werte im Bereich von  $1\mu\text{F}$  bis  $1000\mu\text{F}$ . Messen Sie sowohl die Ausgangsspannung  $U_A$  als auch die Spannung am Ausgang des Schmitt-Triggers und tragen Sie beide synchron über der Zeit auf. Vergleichen Sie die Spannung  $U_A$  beim Kippen des Schmitt-Triggers mit den Schaltpunkten, die Sie vom nichtinvertierenden Schmitt-Trigger kennen. Bestimmen

Sie die Steigung  $\dot{U}_A$  beider Flanken der Ausgangsspannung und vergleichen Sie mit der Theorie des Integrierers. Berechnen Sie die Periodendauer aus der Steigung der beiden Flanken und den beiden Umschaltpunkten und vergleichen Sie mit der gemessenen Periodendauer.

# Kapitel 5

## Ablauf des Versuches

### 5.1 Die Versuchswoche

Der Versuch ist innerhalb einer Woche (fünf Praktikumstage) durchzuführen:

*Montag* Vorbesprechung, Einarbeitung in LabVIEW, Erstellen von VIs und Sub-VIs, Einführung in die Messtechnik.

*Dienstag* Einfache Schaltungen mit Operationsverstärkern (die für spätere Versuche genutzt werden können), Anwendung dieser Schaltungen zur Aufnahme einfacher Kennlinien.

*Mittwoch* Transistorkennlinien und Transistorschaltungen, je nach Zeitaufwand Vorbereitung des Wahlversuches.

*Donnerstag* Wahlversuch, Vorbereitung des Seminarvortrags.

*Freitag* Seminarvortrag.

### 5.2 Der Seminarvortrag

Der Seminarvortrag dient dazu, anderen Studierenden die Inhalte des Versuches und die in der Versuchswoche gewonnenen Erkenntnisse zu präsentieren. Jeder Vortragende hat dafür 10 Minuten Zeit, die strikt einzuhalten sind. Der Vortrag sollte so gestaltet sein, dass ihn auch jemand versteht, der den Versuch selbst nicht durchgeführt hat. Die Teilnehmer des LabVIEW-Versuchs sollten dabei mit ihren Vorträgen die folgenden Themen abdecken:

- Was ist LabVIEW? Wie unterscheidet es sich von anderen Programmiersprachen? Was ist ein VI, wie erstellt man es und wie wird es ausgeführt?
- Wie funktioniert computergestützte Datenerfassung? Welchen Daten werden erfasst? Wie gelangen sie in den Computer?
- Was wurde in der Versuchswoche gemessen? Welche Erkenntnisse konnten daraus gewonnen werden?

## 5.3 Das Versuchsprotokoll

Zur erfolgreichen Durchführung des Praktikumsversuchs gehört die Anfertigung eines Versuchsprotokolls, in dem alle durchgeführten Versuche dokumentiert und die Ergebnisse dargestellt werden. Genau wie der Seminarvortrag sollte dieses auch für jemanden verständlich sein, der den Versuch nicht selbst durchgeführt hat. Folgende Punkte sollten Sie dabei beachten:

- Zu jedem Versuch sollten die theoretischen Grundlagen kurz erläutert sein, die zum Verständnis des Versuches notwendig sind.
- Jede Schaltung sollte in Form eines Schaltplanes dokumentiert sein, der erkennen lässt, was während des Versuches gemessen wurde. Dazu gehört eine schriftliche Beschreibung der Funktionsweise der Schaltung.
- Zu jedem verwendeten VI sollte ein Blockdiagramm vorhanden und seine Funktion schriftlich erläutert sein.
- Die Ergebnisse jedes Versuches sollten zusammengefasst und mit den theoretischen Erwartungen verglichen werden.

# Kapitel 6

## Vorbereitung

Der Versuch *Digitalelektronik* ist relativ umfangreich, so dass eine gründliche Vorbereitung für die Versuchsdurchführung notwendig ist. Insbesondere wird ein gutes Verständnis der Funktionsweise der verwendeten elektronischen Bauelemente vorausgesetzt. Sehr viele Informationen über *LabVIEW*<sup>®</sup> (Tutorials, Demos, Manuals, Guided Tour) erhält man auf den Internetseiten des Herstellers:

<http://www.ni.com/labview> oder

<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/5054>.

Anhand eines Tutorials erlernen Sie am ersten Versuchstag die für den Versuch erforderlichen Kenntnisse über *LabVIEW*<sup>®</sup>.

Zur weiteren Vertiefung kann folgende Literatur herangezogen werden:

1. W. Georgi, Geo Einführung in LabVIEW : mit 133 Aufgaben, 3.Aufl., Hanser Verlag, München (2007)
2. H.-G. Dahn, Praxisbuch LabVIEW 3: Professionell messen, steuern, regeln, simulieren mit Hilfe graphischer Objekte, IWTVerlag, Vaterstetten bei München (1993)
3. D. Zastrow, Elektronik: Einführung in Analogtechnik, Digitaltechnik, Leistungselektronik, Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden (1997)
4. K. Beuth, W. Schmusch, Grundsaltungen. Elektronik 3, Vogel-Verlag, Würzburg (1997)
5. U. Tietze, Ch. Schenk, Halbleiterschaltungstechnik, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg (1999)
6. H. Hinsch, Elektronik, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg (1996)
7. J. Pütz (Hrsg.), Einführung in die Elektronik, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main (1974)

# Kapitel 7

## Fragen und Aufgaben

Folgende Fragen sollten Sie nach der Vorbereitung auf den Versuch ohne Schwierigkeiten beantworten können:

### 7.1 Pflichtversuche

- Was unterscheidet LabView von anderen Programmiersprachen?
- Was sind die grundlegenden Funktionen von LabView?
- Was ist ein VI?
- Welche Funktion besitzen Frontpanel und Blockdiagramm?
- Wie bekommt man die Messdaten in den PC?
- Wodurch zeichnet sich ein ohmscher Widerstand aus (Widerstandskennlinie)?
- Welchem Zeitgesetz folgt die Auf-/Entladung eines Kondensators?
- Wie funktioniert eine Diode und welchen Kennlinienverlauf sie? Anwendungen?
- Wie ist ein Transistor aufgebaut und wie funktioniert er?
- Wie sehen die Kennlinien eines Transistors aus?
- Wie ist ein einfacher Transistorverstärker aufgebaut?
- Was macht ein Schmitt-Trigger und wie funktioniert er? Anwendungen?
- Was sind die Eigenschaften eines idealen Operationsverstärkers (OP)?
- Wie berechnet man die Verstärkung der (nicht-) invertierenden OP-Schaltung?

### 7.2 Wahlversuche

Je nachdem, für welchen Wahlversuch Sie sich entscheiden, sollten sie außerdem folgende Fragen beantworten können.

### 7.2.1 Solarzelle

- Wie funktioniert eine Fotodiode?
- Was bezeichnet man als spektrale Empfindlichkeit?
- Was versteht man unter der „Linearität“ eines Detektors?
- Welche Eigenschaften besitzen sog. Kantenfilter?

### 7.2.2 Gekoppeltes Pendel

- Welche Parameter benötigt man zur Charakterisierung der Bewegung eines gekoppelten Pendels?
- Wie berechnet man die Bewegung eines gekoppelten Pendels?
- Was sind die Eigenschwingungen und ihre Frequenzen?
- Wovon hängen diese ab?

### 7.2.3 Operationsverstärker

- Wie funktionieren ein Integrierer und ein Differenzierer?
- Worin unterscheiden sich Verstärker und Komparator?
- Wie lässt sich ein Komparator als Schmitt-Trigger verwenden?
- Wie lassen sich mit Operationsverstärkern periodische Vorgänge realisieren?