

Anleitung zur Erstellung von Praktikumsberichten und Protokollen

Praxistipps für Studenten an Universitäten und Fachhochschulen

Autor

Dipl.-Ing. (FH) Denis Nordmann

PDF-Version online verfügbar unter http://physik.co-i60.com/

Letzte Aktualisierung am 19.02.2017 20:04



Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International zugänglich.

Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <u>http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/</u> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

← Statue von Johannes Gutenberg in Mainz. Foto: D. Nordmann

Inhalt

Einleitung und Motivation	5
Lernziele	5
Was ist ein "Protokoll"?	6
Messprotokoll	7
Äußere Form	7
Erlaubte Schreibmittel	8
Korrekturen von Schreibfehlern	8
Tabellen in Messprotokollen	8
Sonstige Tipps	9
Zeitmanagement ist wichtig!	9
Beispiel eines Messprotokolls	9
Erstellen der Ausarbeitung1	.1
Standardsoftware im ingenieur- und naturwissenschaftlichen Studium (Stand: 2017) 1	.1
Betriebssysteme für den PC 1	.1
Textverarbeitung1	.1
Berechnungen und Statistik1	.2
Anforderungen an die äußere Form1	.4
Schreibstil 1	.5
Layout und Schriftbild1	.6
Rechtschreibung und Grammatik1	.6
Gliederung1	.6
Fragenteil1	.7
Auswertung 1	.7
Teil a) Bestimmung der Dichte 1	.7
Teil b) Messung der Wärmekapazität1	.7
1 Fragen zum Versuch 1	.7
2 Auswertung 1	.7
2.1 Teil a)	.7
2.2 Teil b) 1	.7
Physikalische Größen und Einheiten 1	.8
Tabellen 1	.8
Abbildungen und Grafiken	21
Skizzen und schematische Darstellungen2	21
<i>x-y</i> -Diagramme	25
Fotos, Screenshots etc	32

Formeln und Gleichungen	33
Beispiel 1: eine einfache Formel aus der Mathematik	34
Beispiel 2: Mischungsgleichung aus der Wärmelehre	34
Beispiel 3: Eine etwas kompliziertere Formel	35
Kurze Befehlsreferenz für die Formeleingabe	35
Gleichungen nummerieren	37
Auswertung von Versuchen	38
Einfache Rechnungen und Zwischenrechnungen	38
Beispiel 1: Herleitung der Mischungsgleichung, Berechnung der Mischtemperatur	39
Beispiel 2: Auswertung einer Längenmessung	39
Regressionsanalyse	41
Einheiten von Fitparametern	41
Lineare Regression in Excel	42
Lineare Regression auf dem Millimeterpapier	43
Regression von Kurven mit exponentiellem Verlauf	44
Umgang mit Ausreißern	47
Fehlerrechnung	48
Vorgehensweise bei der Fehlerfortpflanzung	50
Angabe von Fehlern, Rundungsregeln	51
Vergleichbarkeit mit Literaturwerten	54
Suche nach einem Literaturwert	54
Korrekturen	56
Schlusswort	69
Anhang	57
Checkliste "Messprotokoll"	57
Angaben zur Vollständigkeit	57
Angaben zur Eindeutigkeit	57
Angaben zu Fehlern und Messunsicherheiten (sofern erforderlich)	57
Nicht erlaubt ist	57
Bei Versuchsende	57
Checkliste zur Ausarbeitung	58
Anforderungen an die äußere Form	58
Anforderungen an die Ausarbeitung	58
Auswertung	59
Tabelle mit Student <i>t</i> -Faktoren	61
Anleitung zur Regression nach der "Methode der kleinsten Quadrate" in Excel	62

Regression einer Amplitudenresonanz-Funktion	62
Hintergrundinformationen zum Experiment	62
Ermittlung der Fitparameter mit Excel	64
Funktionsprinzip	65
Excel-Solver aktivieren	65
Vorbereitung der Daten und Durchführung der Regression	

Einleitung und Motivation

Ziel dieser etwas ausführlich geschriebenen Anleitung ist es, Erstsemesterstudenten bzw. Studenten in den natur- und ingenieurwissenschaftlichen Studienfächern bei der Ausarbeitung von Laborberichten bzw. Protokollen im Physiklabor an einer Universität (Uni) oder Fachhochschule (FH) unterstützen. Auch Schüler an Fachoberschulen oder Berufskollegs oder Techniker können davon profitieren, falls sie sich auf ihr zukünftiges Studium vorbereiten möchten.

In dieser Anleitung geht es um das wissenschaftliche Arbeiten.

Während meiner Zeit als Student habe ich viele positive aber auch negative Erfahrungen beim Verfassen von Protokollen gesammelt. Dabei hatte ich mit Dozenten verschiedenster Art zu tun. Jeder Dozent hatte seine eigenen Vorstellungen, Wünsche und Vorgaben wie ein Protokoll aussehen sollte. Diese Anforderungen galt es zu "erfüllen", sofern man ein "T" für Testat auf dem Ausdruck der Studienleistungen haben wollte. Da sich die Professoren untereinander nicht auf einen einheitlichen Stil der Ausarbeitungen einigen konnten, war ein gewisses Chaos vorprogrammiert.

Diese Erfahrungen nehme ich als Grundlage für diese Anleitung und möchte dem einen oder anderen wertvolle Tipps geben. Gerade als Studienanfänger ist man eher unerfahren und sehr verunsichert, was die Erstellung von Ausarbeitungen bzw. Protokollen betrifft. Von daher ist diese Anleitung so gestaltet, dass neue Studenten mit ihr arbeiten können.

Betrachtet diese Anleitung als eine Art Leitfaden/Nachschlagewerk und nicht als Vorschrift, da jeder Dozent seine eigenen Vorstellungen von einer "guten" Ausarbeitung hat. Bei der Erstellung von Laborprotokollen gibt es kein "richtig" oder "falsch". Im Zweifelsfall müsst ihr euch an die Richtlinien eurer Laborbetreuer und Professoren halten.

Diese Anleitung habe ich im September 2015 geschrieben, jedoch nirgends veröffentlicht. Nach 1,5 Jahren auf der Festplatte habe ich sie überarbeitet und möchte sie nun mit euch teilen.

Lernziele

Im Grundstudium lernt ihr, wie Experimente durchgeführt, dokumentiert und präsentiert werden. Diese Methodik wendet ihr wiederum in den höheren Semestern an, um komplexere Aufgabenstellungen im Rahmen eines Seminars, einer Projektarbeit oder einer Bachelorarbeit nach den wissenschaftlichen Methoden zu bearbeiten.

Wenn man das wissenschaftliche Arbeiten nicht im Grundstudium lernt, lernt man es halt in den höheren Semestern. Erfahrungsgemäß bleiben dabei andere, wichtigere Sachen liegen und das Studium verlängert sich unnötig. Drum wäre doch sehr schade, wenn ihr euch kurz vor der Bachelorarbeit mit diesem Thema aus längst vergangenen Semestern beschäftigen müsstet.

Ich versuche euch mithilfe von positiven und negativen Beispielen deutlich zu machen, warum die Dinge sind, wie sie sind. Neben wichtigen Tipps gebe ich euch konkrete Beispiele, wie ihr beim Erstellen von Protokollen vorgehen könnt und was ihr unbedingt berücksichtigen solltet.

Falls ihr wenig oder keine Zeit zum Durchlesen dieser Anleitung habt – keine Panik! Im Anhang dieses Dokuments gibt es eine kurze Zusammenfassung der jeweiligen Abschnitte in Form von Checklisten, welche euch bei der Bearbeitung von Ausarbeitungen nützlich sein könnten.

Für Korrekturvorschläge (am besten via E-Mail) oder Verbesserungen der inhaltlichen Fehler bzw. der Rechtschreibfehler bin ich dem aufmerksamen Leser sehr dankbar.

Was ist ein "Protokoll"?

Ein Bericht bzw. eine Ausarbeitung (oft "Protokoll" genannt) ist eine schriftliche Dokumentation einer Aufgabenstellung, welche Sie als Student/Studentin mithilfe von ingenieur- bzw. naturwissenschaftlichen Methoden bearbeitet haben. Die Aufgabenstellung kann beispielsweise eine umfangreiche Berechnung (Simulation), eine Studie oder ein Experiment sein.

Während des Grundstudiums an einer Hochschule erfolgt die Dokumentation in Form von Laborberichten oder Studienarbeiten. Die Abschlussarbeit (Bachelor bzw. Master Thesis) stellt ebenfalls eine Art des "Protokolls" dar. Der Umfang eines Berichts kann je nach Komplexität und Anforderungen zwischen 1 bis 30+ Seiten variieren, bei der Abschlussarbeit gibt es gesonderte Vorgaben. Diese Vorgaben sind in der Bachelor-Prüfungsordnung des jeweiligen Studiengangs festgehalten. Im Rahmen eines typischen Physiklabors an einer Fachhochschule kann der Umfang variieren: typisch sind 2 bis 10 Seiten pro Versuchsauswertung, an Universitäten ist ein Umfang von mehr als 15 Seiten pro Versuch möglich.

Das **Ziel** einer technischen bzw. wissenschaftlichen Dokumentation ist es, der nachfolgenden Person alle Fakten und Zahlen so offen zu legen, dass er bzw. sie das Experiment selbstständig wiederholen kann, ohne Rücksprache mit Ihnen halten zu müssen.

Dieses **Ziel** sollten Sie sich immer vor die Augen führen. Sie wollen einen Bericht verfassen, welcher keine Fragen an Sie mehr offen lässt. Der Leser Ihres Berichts muss wissen, was genau Sie gemacht haben, wie Sie vorgegangen sind, wie die Ergebnisse lauten, was Sie daraus schließen und wie Sie Ihre Ergebnisse beurteilen.

Ein vollständiger Bericht besteht in der Regel aus einem Deckblatt, einem handschriftlich angefertigten Messprotokoll, einer Ausarbeitung sowie wichtigen/nützlichen Anhängen (z. B. maschinell angefertigte Messergebnisse, Datenblätter, Kopien von bestimmten Dokumenten usw.).

Messprotokoll

Während eines physikalischen Praktikums sind Sie im Physiklabor tätig und müssen sich im Rahmen von Experimenten ständig irgendwelche physikalischen Größen notieren, Berechnungen durchführen und anhand dieser Berechnungen ein Messergebnis präsentieren. Im Rahmen einer Dokumentation werden alle Parameter, Messwerte und wichtige Ereignisse (z. B. ungeplante Abweichungen von der Versuchsanleitung) handschriftlich protokolliert. Das Messprotokoll bildet die Grundlage für Ihre Ausarbeitung.

Äußere Form

Prinzipiell wäre es möglich, dass Sie ihre Messwerte bzw. Ergebnisse auf einem Papiertuch oder einer Serviette niederschreiben (siehe Abbildung 1). Aber würden Sie so etwas Ihrem Dozenten oder Arbeitgeber präsentieren? Oder einem Kunden? Sicher nicht... (OK, es gibt sicherlich Ausnahmefälle!).



Abbildung 1 Ihre Berechnungen können Sie auf verschiedenen Papierformen dokumentieren. Hier dargestellt von links nach rechts: gefaltetes DIN A4 Blatt, Rückseite eines Briefumschlags, ein Haushaltstuch. Die Abgabe sollte allerdings nicht in dieser Form erfolgen ;-)

Eine andere Möglichkeit wäre, die Messwerte direkt in das Notebook/Tablet/Smartphone einzugeben. Aber was passiert, wenn Sie vergessen, die Datei zu speichern oder sie löschen unbeabsichtigt Teile der Daten. Dann haben Sie ein Problem! Aus diesem Grund wird "schwarz auf weiß" dokumentiert – also auf dem Papier. Auch <u>rechtliche Gründe</u> spielen dabei eine Rolle, da ein Messprotokoll eine Art von Urkunde darstellt.

Damit die Eindeutigkeit gewährleistet ist, müssen Sie jedes angefertigte Messprotokoll stets mit folgenden Angaben beschriften:

WICHTIG

- Namen der Experimentatoren, ggf. auch Matrikelnummern
- Datum der Durchführung
- Name des durchgeführten Versuchs
- Seitenzahlangabe ist sinnvoll bei mehreren Seiten bzw. Blättern *Beispiel:* 1/1 bei einer Seite; 1/7, 2/7, 3/7 ... etc.

Ihre Unterschrift bzw. Ihre Matrikelnummer ist in der Regel nicht notwendig. Schreiben Sie klar und deutlich, sodass andere Studenten Ihre Zahlen erkennen können. Packen Sie nicht zu viele Informationen auf eine Seite, da Sie eventuell Ergänzungen mit einbringen müssen (z. B. Werte oder Kommentare). Die Angaben der Seitenzahlen sind nützlich gegen das "Verzetteln".

Erlaubte Schreibmittel

Als Schreibmittel benutzen Sie bitte entweder Kugelschreiber oder einen Füllfederhalter. Erlaubte Farben sind Blau oder Schwarz. Nicht erlaubt ist die Farbe Rot, da diese von den Dozenten für die Korrekturen benutzt werden. Protokollierung von Messwerten mit Bunt- oder Bleistiften wird nicht gerne gesehen, da Ihre Messwerte absichtlich (oder auch unabsichtlich) wegradiert werden können und dieser Umstand viel Spielraum für Fälschungen oder nachträgliche Korrekturen lässt.

Ausnahme: Sie dürfen Skizzen mit dem Bleistift anfertigen oder Tabellenrahmen zeichnen. Das Notieren der Messwerte sowie Berechnungen dürfen nur mit einem Kugelschreiber/Füllfederhalter durchgeführt werden.

Korrekturen von Schreibfehlern

Falls Sie sich irgendwo verschrieben haben: der Wert wird einmalig durchgestrichen und der korrigierte Wert wird direkt darüber (oder daneben, je nach verfügbarem Platz) geschrieben. Unkenntlich machen durchs Schwärzen oder Anwenden von Korrekturflüssigkeit/Korrekturrollern ist nicht erlaubt.

Tabellen in Messprotokollen

Eine Tabelle besteht aus Inhalten (Text, Zahlen, Symbole, Messwerte), welche in Zeilen (horizontal bzw. waagerecht) und Spalten (vertikal bzw. senkrecht) angeordnet sind. Mithilfe einer Tabelle werden Ihre Daten übersichtlich dargestellt. Eine Tabelle zu erstellen ist nicht schwer. Dennoch gibt es einige Details, die Sie beachten sollten:

- Zeichnen Sie immer die Rahmenlinien ein, um die Zeilen und Spalten voneinander zu trennen.
- Ein wichtiger Bestandteil einer Tabelle ist der Tabellenkopf, in dem Sie die Spaltenüberschrift unterbringen. Der Tabellenkopf enthält die physikalische Größe (z. B. Spannung U, Kraft F, Fläche A usw.) und die Einheit (Volt, Newton, Quadratmeter). Die Notation U/V ist korrekt dividiert durch Volt) und wird hier ausdrücklich (lies: U empfohlen. Oft wird in den Tabellenkopf U [V] geschrieben. Diese Notation ist eher veraltet und nicht ganz korrekt, da die eckigen Klammern eine bestimmte Bedeutung haben¹. Sie wird aber toleriert, da sie recht häufig verwendet wird.
- Die erste Zelle des Tabellenkopfes (ganz links oben) wird typischerweise mit Messwert-Nr. oder *N* (oft auch mit *n* oder *i*) beschriftet. Damit werden die Zeilen darunter in aufsteigender Zahlenfolge (1, 2, 3, 4, 5, ...) beschriftet. Es ist nicht immer notwendig, aber praktisch, um beispielsweise auf einen bestimmten Messwert zu verweisen ("Messwert Nr. 15 ist ein Ausreißer" hört sich besser an als "der 7. Messwert von unten ist ein Ausreißer", oder?)
- In die Zeilen unterhalb des Tabellenkopfes werden die Zahlenwerte notiert.
- Grenzen Sie die Zeilen und Spalten voneinander ab, damit die Daten eindeutig zugewiesen werden können.
- Wenn Sie die Tabelle nicht mit Werten gefüllt bekommen, streichen Sie einfach die freien Zellen. Damit deuten Sie an, dass in die Tabelle keine Einträge mehr erfolgen.

¹ Korrekte Anwendung der eckigen Klammern wäre beispielsweise [U] = V bzw. [F] = N. Das soll bedeuten, dass die Maßeinheit der physikalischen Größe U das Volt ist. Die Einheit von F ist Newton.

Sonstige Tipps

- Notieren Sie sich alle Parameter wie Temperaturen, Hersteller/Typ des Multimeters, Spannungen, Uhrzeit, Wetter, Sonnenstand, die Laune ihres Laborpartners etc.! Wenn während des Experiments etwas schief gelaufen ist und Sie es erst eine Woche später bei der Auswertung merken, dann sind sie auf alle Informationen in Ihrem Messprotokoll angewiesen. In dem Falle gilt: "zu viel ist besser als zu wenig".
- Machen Sie sich immer eine Skizze von dem Versuch und beschriften Sie sie nach Ihren Wünschen. Falls Sie ein Smartphone mit Kamera besitzen: machen Sie ein Foto von dem Versuchsaufbau!
- Kommentieren Sie Ihre Durchführung. Schreiben Sie Ihre Gedanken und eventuelle Zweifel auf. Begründen Sie, warum Sie bei der Durchführung improvisieren mussten und welchen Einfluss das auf Ihr Ergebnis haben könnte.

Zeitmanagement ist wichtig!

Wenn Sie hier angekommen sind, dann haben Sie vermutlich Ihren ersten Praktikumstag heil überstanden. Der Labortermin ist vermutlich schon eine Woche her und am nächsten Tag ist der Abgabetermin! Sie haben vermutlich nur noch 6 Stunden Zeit bis zur Abgabe...

Lassen Sie es nicht soweit kommen! Nehmen Sie die Arbeit sehr ernst und starten Sie frühzeitig mit der Ausarbeitung. Vereinbaren Sie einen bzw. mehrere verbindliche Termine mit Ihrem Laborpartner und "ziehen Sie die Sache konsequent durch". Ich persönlich war auch das eine oder andere Mal in dieser Situation, wo ich meinen Schlaf für die Ausarbeitung opfern musste. Für die Ausarbeitung müssen Sie als Anfänger mindestens 4...16 Zeitstunden (pro Versuch wohl gemerkt) einplanen.

Beispiel eines Messprotokolls

In Abbildung 2 ist ein Messprotokoll dargestellt. Es enthält neben Namen des Experimentators auch den Versuchsnamen, das Datum, eine kleine Skizze zum Versuch, eine Berechnung, die Messwertetabelle zum Teilversuch sowie eine Angabe der Seitenanzahl. Zum Zeichnen der Skizze wurde ein Bleistift, für die Berechnung und die Messwerte ein Kugelschreiber mit blauer Farbe verwendet. Die Tabellen sind korrekt beschriftet.

ne Teil A: CR-	Hochpass	Ver	such	Datum	Name	Teil 2	: RC -	TiefpassVersuch	Dat
					•	Skizze		R	
SLIZZE							FT FT		
								(A)	Ora:
Euchinnes 11 0	4 1	F				FG	1 10 ×	4 7 (4)	~ 3 ≿1.
generator to ~	RIT	(F) - Oszilla	skop			9		
0	14	4	1						
Versuchsparame	ter					R=	2200 2	C = 47 nF	$U_0 = 1V_0$
						~	1		
11 - 1 0 V		0-221	000	- 47 NE		ta	= 1,533 KH2		
NO - TI VPP		22		TTNI					
2 . 1	~ n	_			-	Messur	erte		
berechnung der	Cren 2 f	reque,	12				1 Freeman d	1 Seconaria 11	
						Nr	(H2)	(V)	
f=	a f	-	1	and and a second					
9 2.T.R.C	.3	2.π.	2200 52 . 47.1	10-3 1=		1	30	1000 m	
						2	50	1000m	
	1 -	152	9 H2			S	+0	71000m	
	To To	10 3	5 116			4	100	1000m	
						5	200	980m	
						6	500	960 m	
Messwerte						7	700	920 m	
I Frequence 1	Samura U		Frequence L	Seamours U		2	1000	200.	
Nr. (Ha)	(V)	Nr.	(Ha)	(V)		3	1533	360 m	
			(net			19	3000	480m	
1 50	31m	1-	10000	320m		11	5000	300 m	
2 70	43m	12	30000	340m		12	7000	220 m	
2 100		13	50000	240m			10.0.00		
\$ 100	61m	-14	70000	940m		13	10000	160 m	
4 500	780m	15	4.0000.0	2		14	30000	356 m	
500	29.04	15	3 00000		5	1.6	70000	24 M	
700	SJUM	17	500000	1940m			10000	LT m	
7 1000	510m	18	700000			17.	100000	17 m	
8 3000	840m		50000			18	300000	5.6 m	
9 5000	920 m	19	1000000	/		19	500000	3,4 m	
10 7000	920m	20	3000000	/		20	100000	2,3 m	
			1.500	220			1		
		21	1233	t+Um			1	1	

Abbildung 2 Beispiel eines Messprotokolls zum Versuch "Hoch- und Tiefpass". Zum Protokollieren wurden 2 DIN A4 Seiten benötigt. An den rot markierten Stellen (Seite 2/2 oben) fehlen Name und Versuch.

Erstellen der Ausarbeitung

Die Ausarbeitung bzw. ein Protokoll sollte handschriftlich oder mithilfe eines Computers erfolgen. Bei einer handschriftlichen Ausarbeitung gelten ähnliche Regeln wie bei der Erstellung eines Messprotokolls. Vorteile dieser Methode sind beispielsweise die Freiheit der Gestaltung sowie völlige Kontrolle über den Inhalt. Nachteil: irgendwann tut Ihnen die Hand weh und größere Fehler (z. B. falsch berechnete Werte) lassen sich schwer korrigieren. Im schlimmsten Fall darf man die ganze Seite neu schreiben.

Die Ausarbeitung mit dem PC hat ebenfalls Vor- und Nachteile. Der Computer unterstützt Sie an vielen Stellen, allerdings kann er Ihnen nicht die Denkarbeit abnehmen. Der Computer ist so schlau wie sein Benutzer. Vorteile sind sicherlich die copy & paste-Fähigkeiten des PCs sowie die Korrekturund Änderungsmöglichkeiten. Ein wesentlicher Nachteil einer Ausarbeitung am PC ist es, dass man viel Zeit mit der Formatierung des Textes verliert. Ebenfalls kann man sich mit vielen Dokumenten/Dateien "verzetteln".

Standardsoftware im ingenieur- und naturwissenschaftlichen Studium (Stand: 2017)

Betriebssysteme für den PC

Viele Studenten nutzen das Betriebssystem <u>Microsoft Windows</u> in den Versionen 7, 8 und 10 auf ihren Notebooks und PCs. In den Laboren wird immer noch Windows XP (!) eingesetzt. Für Windows gibt es ausreichend Software aber auch eine Menge Schadsoftware, die man sich unbeabsichtigt installieren kann. Die Hochschulen stellen ihren Angehörigen das Windows-Betriebssystem sowie Virenscanner kostenlos zur Verfügung, sodass man teure Anschaffungen vermeiden kann. Ihre IT-Abteilung wird Ihnen Auskunft geben, wie Sie eine kostenlose Studentenversion von Windows beziehen können.

Ansonsten meine persönliche Empfehlung: Setzen Sie sich während Ihres Studiums mit dem Thema Open Source auseinander. Versuchen Sie in Ihrer Freizeit, eine weit verbreitete Linux-Distribution wie <u>Ubuntu</u>, <u>Mint</u>, <u>openSUSE</u> oder <u>Fedora</u> auf Ihren PC zu installieren und versuchen Sie damit zu arbeiten. Es kann sich durchaus Iohnen! Informieren Sie sich über die <u>Alternativen</u> zu "Closed Source" Programmen/Betriebssystemen wie *MS Office* oder *MS Windows*. Alternative Programme zum Schutz Ihrer Privatsphäre sind beispielsweise <u>hier</u> aufgeführt.

Textverarbeitung

Microsoft Word

Das Programm "Word" ist ein Bestandteil von <u>Microsoft Office</u>, einem Programmpaket aus verschiedenen Anwendungen. Leider ist Microsoft Office kostenpflichtig. Für Schüler und Studenten gibt es Rabatte, wobei sich eine Anschaffung wirklich lohnen kann. Word hat sich etabliert und ist für kurze Ausarbeitungen (weniger als 30 Seiten) sehr gut geeignet. Die Studentenversion von Word ist identisch mit der kommerziellen Version von Word und darf während des Studiums sowie für nichtkommerzielle Zwecke verwendet werden. Word hat einige Macken und Nachteile, die jedoch sehr speziell sind – notfalls solltet Ihr vorher im Internet recherchieren, ob das Programm Eure Anforderungen erfüllt, bevor Ihr ~100 EUR investiert.

• LibreOffice Writer

Eine Open-Source Alternative zu MS-Word, ebenfalls für Linux-Betriebssysteme erhältlich. Writer ist Bestandteil des *LibreOffice* Pakets und ist kostenlos erhältlich und besitzt keine Einschränkungen bezüglich des Nutzungsumfangs und der Nutzungsdauer. Man kann mit "Writer" gut arbeiten, allerdings braucht es eine Weile, bis man sich in das Programm

eingearbeitet hat. Vor- und Nachteile gibt es hier auch – am besten im Internet recherchieren und sich eine Meinung bilden.

Google Docs

Es handelt sich dabei um einen Cloud-Dienst der Firma Google. Damit lassen sich ebenfalls Ausarbeitungen in einem Web-Browser verfassen, sofern Sie ein Google-Konto besitzen. Das kann von Vorteil sein, wenn Ihr z. B. an verschiedenen Geräten/PCs arbeitet und nicht mit USB-Sticks die Daten austauschen könnt. Ein weiterer Vorteil ist von "Docs" ist, dass man schnell ein Dokument zusammenschreiben und mit anderen Studenten online teilen und bearbeiten kann. Docs eignet sich für einfache Texte mit geringer Formatierung – für umfangreichere Arbeiten, wo es auf ein spezielles Layout ankommt, ist Docs nicht gut geeignet.

• <u>LaTeX</u>

LaTeX ist eine Auszeichnungssprache und besitzt einen mächtigen Schrift- und Formelsatz. Da, wo Word, Writer & co. scheitern, hat LaTeX ein leichtes Spiel, nämlich bei der Formatierung von umfangreichen Texten (>50 Seiten). LaTeX ist mühsam erlernbar aber es lohnt sich, wenn man früh im Studium damit beginnt! Übung macht den Meister! Wenn es um die Verfassung der Bachelor- oder Masterarbeit geht (später auch der Dissertation bzw. der Doktorarbeit), kommt man um LaTeX nicht herum. Eine Doktorarbeit mit Word zu schreiben ist problemlos möglich, allerdings sehr riskant und zeitintensiv. Go google it! Für Windows ist <u>MikTeX</u> die populärste Distribution, unter Linux nutzt man <u>texlive</u>. Als LaTeX-Editoren sind <u>TeXnicCenter</u> oder <u>TeXmaker</u> populär.

Berechnungen und Statistik

• Microsoft Excel

Excel ist ein populäres Tabellenkalkulationsprogramm. Excel kann rechnen und Diagramme erstellen. Der Funktionsumfang von Excel ist sehr groß und man sollte eine gewisse Einarbeitung in Betracht ziehen. Die in Excel erstellten Diagramme und Tabellen lassen sich sehr leicht in Word-Dokumente kopieren. Um Excel kommt man kaum drum herum, wenn es um die Auswertung von Versuchen in den Grundpraktika geht. Später relativiert sich das, ansonsten sehr empfehlenswert.

LibreOffice Calc

Die freie Alternative zu Excel. Kostenlos erhältlich, kann nahezu alles was Excel auch kann. Auch hier ist eine Einarbeitung notwendig. Problematisch wird es mit Dateiformaten, die zwischen Calc und Excel ausgetauscht werden. Das kann sehr nervig sein, da die Formatierung bei der Konvertierung von einem Format ins andere verloren geht. Die schönen Tabellen sehen dann komisch aus und die Ergebnisse stimmen nicht mehr. Tricky, aber machbar.

Google Sheets

Cloud-Dienst von Google. Ähnlich wie bei Google Docs kann man sehr schnell und unkompliziert Tabellen in einem Web-Browser erstellen und Überschlagsrechnungen durchführen.

- Sonstige Programme
 - o <u>Origin</u>

Ein Statsitikprogramm (kostenpflichtig, Mietlizenz ca. 100 EUR/Jahr) zur umfangreichen Datenanalyse. Wird meistens in Laboren oder an Instituten eingesetzt. Kann sehr schöne Diagramme plotten und besitzt sehr umfangreiche Statistikfunktionen, ansonsten ist die Bedienung eher schwierig und erfordert eine gewisse Frustrationstoleranz. Das Origin-eigene Dateiformat ist strikt "closed source" und sehr einschränkend bezüglich der Verwendung mit anderen Programmen. o <u>Qtiplot</u>

Ein Origin-Klon. Gibt es in zwei Versionen: frei verfügbar und <u>kommerziell/kostenpflichtig</u>. Vom Funktionsumfang her nahezu identisch mit Origin, eventuell sogar etwas besser. Nützlich, wenn man publikationsreife Diagramme (für wissenschaftliche Veröffentlichungen) benötigt.

o <u>MATLAB</u>

Eine Programmiersprache und Entwicklungsumgebung der US-Amerikanischen Firma "The MathWorks". Ist in Ingenieurwissenschaften (Maschinenbau, Elektrotechnik, evtl. auch Physik) sehr populär. MATLAB ist kostenpflichtig (ca. 82 EUR als Studentenversion) und erfordert intensive Einarbeitung. An manchen Hochschulen gibt es Campuslizenzen und somit kostenlos erhältliche MATLAB-Versionen.

o <u>GNU Octave</u>

Kostenlose Open-Source-Variante zu MATLAB, größtenteils MATLAB-kompatibel.

Zeichnen und Skizzieren

Als Zeichenprogramm empfehle ich <u>Inkscape</u>. Mit Inkscape lassen sich technische Zeichnungen erstellen, beschriften und in ein beliebiges Format (PNG, JPEG, EPS, SVG, PDF) exportieren. Verwenden Sie Vektorgrafiken (SVG, EPS, PDF) wo es nur geht, da sich diese beliebig skalieren lassen, ohne dass die Qualität darunter leidet. Falls Sie mit Inkscape nichts anfangen können, probieren Sie es doch mit *PowerPoint*, das im Microsoft Office Paket bereits enthalten ist. Es handelt sich dabei um ein Programm zur Erstellung von Präsentationen, aber es besitzt Zeichenfunktionen, die für Sie interessant sein können. "Lotteriegewinner" unter Ihnen werden die kommerziell erhältlichen Programme wie Adobe Illustrator oder Corel Draw mögen.



Abbildung 3 Vektor-Grafikprogramm Inkscape. Das Programm gibt es auch in deutscher Sprache.

Für die Bearbeitung von Bildern (Fotos) bietet sich das Open Source Programm <u>GIMP</u> an. Profis und Lotteriegewinner setzen auf *Adobe Photoshop*. Um hochwertige schematische Darstellungen für LaTeX zu erstellen, habe ich das Programm <u>ipe</u> benutzt.

Wenn es schnell gehen soll (Sie müssen beispielsweise schnell ein unbestimmtes Integral berechnen) empfehle ich den Online-Dienst *Wolfram Alpha* (<u>www.wolframalpha.com</u>). Wolfram Alpha basiert auf dem Computeralgebra-System <u>Mathematica</u> (einer mathematisch-naturwissenschaftlichen Software) und kann Ihnen beim Differenzieren oder Integrieren sowie beim Lösen verschiedenster Aufgaben helfen (z. B. bei der Umrechnung von Zahlenwerten in SI-Einheiten, Rechnung mit komplexen Zahlen etc.).

Anforderungen an die äußere Form

- Ihre Messprotokolle und Berichte verfassen Sie auf Blättern der Größe DIN A4
- Das Blatt kann liniert, kariert bzw. weiß sein
- Auf dem Blatt haben Sie die volle Gestaltungsfreiheit aber lassen Sie auf der rechten Seite des Blattes einen 2 bis 3 cm breiten Rand, damit der Dozent Korrekturen und Anmerkungen notieren kann
- Vergessen Sie nicht, den jeweiligen Blättern die Seitenzahlen hinzuzufügen



Abbildung 4 Typische Einstellungen für Seitenränder in Microsoft Word.

Ihre handschriftlich angefertigten Messprotokolle können Sie beidseitig beschriften, Ihre Ausarbeitungen sollten nur einseitig beschriftet werden. Sorgen Sie dafür, dass die Blätter gelocht sind und keine Makel wie Eselsohren, Risse, Fett- oder Kaffeeflecken aufweisen. Die Blätter werden vorzugsweise in einem Schnellhefter aus Kunststoff mit transparentem Sichtfenster abgelegt. Papphefter sind ebenfalls erlaubt.

- Bitte keine Heftstreifen verwenden. Die Blätter sind ungeschützt, können sich losreißen bzw. zerfleddert werden. Sprechen Sie sich mit dem Dozenten ab, falls Sie Heftstreifen verwenden möchten.
- Bitte keine Bewerbungsmappen oder Klarsichthüllen verwenden. Bei Bewerbungsmappen können die Blätter herausfallen und somit verloren gehen. Klarsichthüllen erschweren die Korrektur. Bewerbungsmappen bzw. Klarsichthüllen werden nicht angenommen.
- Die Protokolle (d. h. Deckblatt, Messprotokoll und Ausarbeitung) bitte nicht mit einem Tacker oder Büroklammern heften. Ich persönlich bin dagegen aber es gibt Dozenten, die das explizit fordern. Bei Mehrfachkorrekturen werden die Blätter durchs Heften beschädigt und sehen nicht gut aus.



Abbildung 5 Ihre Ausarbeitungen sollten Sie vorzugsweise in einem Schnellhefter aus Kunststoff (links) abgeben. Der Schnellhefter aus Pappe (mitte) ist erlaubt, sollte allerdings von außen mit Ihrem Namen und Versuchsnummer beschriftet werden. Die Variante mit Heftstreifen (rechts) sollte nicht verwendet werden.

Schreibstil

Schreiben Sie kurze und präzise Sätze. Sie müssen keinen 200-Wörter-Aufsatz schreiben aber auch keine SMS-Nachrichten mit 160 Zeichen. Vermeiden Sie Internet-Chat typische Ausdrücke wie evtl., vllt., kA, mMn oder Fachausdrücke wie "HDGDLFIUEBAED" usw. Vermeiden Sie Pronomen wie "ich" oder "wir" sowie die Nennung von Vornamen. Formulieren Sie den Text neutral und unpersönlich.

Falsch

Ich habe etwa 259,38 Gramm Wasser abgewogen, es in das Becherglas umgefüllt und anschließend 5 Minuten gewartet. Nach 5 Minuten habe ich ein paar Eiswürfel zugegeben und die Temperatur gemessen. Das Rühren hat der Bernd übernommen, ich habe die Werte notiert. Da alles so schnell ging, ist die Messung der Kurve nicht gelungen.

Richtig

Es wurden 259,38 g Wasser abgewogen. Nach einer Wartezeit von 5 Minuten wurden dem Wasser 5 Eiswürfel unter ständigem Rühren zugegeben. Die Temperaturwerte wurden in Intervallen von 15 s abgelesen, wobei der Temperaturausgleich bereits binnen 15 s abgeschlossen war. Der genaue Verlauf der Temperaturkurve konnte somit nicht erfasst werden.

Abbildung 6 Sehr schwammige Beschreibung eines (fiktiven) Mischexperiments. Hier wird einerseits jeder Handgriff beschrieben, andererseits werden experimentelle Gegebenheiten unpräzise formuliert ("etwa" 259,38 Gramm Wasser ?!). Der letzte Satz deutet an, dass die Experimentatoren eher unvorbereitet waren.

Beschränken Sie sich auf das Wesentliche. Sicherlich kann man die ganze Theorie des Versuchs oder der Fehlerrechnung herunterbeten, aber wenn Sie nur eine Formel aus einem Wälzer² brauchen – schreiben Sie die Formel bzw. eine kurze Herleitung hin und verweisen auf die Literatur.

Vermeiden Sie widersprüchliche Sätze oder Spekulationen. In ein Protokoll gehören nur Tatsachen hinein, d. h. nur Fakten, die Sie auch belegen können.

² Ein Wälzer ist ein dickes, sehr schweres und unhandliches (Physik/Mathe) Lehrbuch (*m* > 3,14159265 kg).

Vermeiden Sie Possessivpronomen. Ausdrücke wie "mein Becherglas", "unsere Stoppuhren" oder "sein Thermometer" gehören nicht in einen Bericht rein. Die Geräte gehören nicht Ihnen und Sie haben das Experiment nicht entworfen.

Layout und Schriftbild

- Seien Sie äußerst sparsam mit **fettem**, *kursivem* und <u>unterstrichenem</u> <u>**Text**</u>. Heben Sie nur wichtige Ergebnisse hervor
- Verwenden Sie nur eine Schriftart (Calibri, Arial oder Times New Roman) für das gesamte Dokument
- Die Schriftgröße kann zwischen 10 pt, 11 pt oder 12 pt variieren
- Verzichten Sie auf ablenkende Texteffekte oder ausgefallene Designs
- In die Kopfzeile fügen Sie Ihren Namen und die Matrikelnummer ein
- In die Fußzeile kommt die Seitenzahl

Verwenden Sie im Text bzw. in Ihren Grafiken keine Farben, wenn Sie Ihre Ausarbeitung in schwarzer Farbe bzw. Graustufen ausdrucken wollen. Die Farbinformation geht beim Ausdruck verloren, d. h. der PC wandelt das Farbbild in ein Graustufenbild um, welches sehr blass wirkt und der Text schlecht lesbar wird.

Rechtschreibung und Grammatik

Ingenieure sind keine Deutschlehrer. Die Schrift und Sprache sind nur ein Mittel zum Zweck. Dennoch müssen wir Ergebnisse unserer Arbeit nach außen hin kommunizieren. Formulieren Sie kurze und präzise Sätze, sodass es Ihre Kollegen verstehen.

Es gilt der Grundsatz: Rechtschreibfehler sind lästig und peinlich. Rechtschreibfehler können im schlimmsten Fall die Seriosität eines Ingenieurs in Frage stellten. Bedenken Sie: es gibt immer irgendwelche Grammatik-Pedanten, die sich lieber für Ihre Rechtschreibung und Grammatik interessieren als für Ihre Arbeit als Ingenieur. Bieten Sie solchen Menschen keine Angriffsfläche an! Mithilfe der Autokorrektur von Word können Rechtschreibfehler größtenteils vermieden werden. In Ausnahmefällen hilft der Duden (www.duden.de).

Gliederung

Die Gliederung des Protokolls dient der Übersicht. Heben Sie verschiedene Abschnitte mit großen Überschriften hervor, sodass ein roter Faden erkennbar ist. Abschnitte kann man anschließend in Unterabschnitte und Unter-Unterabschnitte gliedern. Im Rahmen des Physiklabors ist dies jedoch nicht unbedingt notwendig. Es ist Ihnen überlassen, wie Sie Ihre Arbeit gliedern.



Abbildung 7 Beispiel einer Gliederung. Die Abschnitte "Fragenteil" und "Auswertung" sowie deren Unterabschnitte sind vom Text deutlich hervorgehoben.

1 Fragen zum Versuch a) Wie lautet die Einsteinsche Gleichung? Sie lautet $E = mc^2$. Sie beschreibt die Äquivalenz von Masse und Energie. b) Warum ist der Himmel blau? Das Sonnenlicht (EM-Strahlung) wird von den Gasmolekülen in der Erdatmosphäre elastisch gestreut (Rayleigh-Streuung). Dabei wird der Blauanteil stärker ... c) ... 2 Auswertung 2.1 Teil a) Zur Bestimmung der Dichte nach der Formel $\rho = \frac{m}{V}$ wurde die Masse mit m = 0,00105 kg und das Volumen mit V = 1000 cm³ bestimmt... 2.2 Teil b) ...

Abbildung 8 Beispiel einer alternativen Gliederung mit Nummerierung.

Physikalische Größen und Einheiten BITTE BEACHTEN!

- Zu jeder Maßzahl gehört eine physikalische Einheit Erlaubt: U = 100 V I = 25,9 mA $p = 101325 \text{ N/m}^2$ T = 23 °CNicht erlaubt: U = 100 I = 25,9 p = 101325 Newton pro m² Temp. = 23°
- Die Maßzahl und die physikalische Einheit werden durch ein Leerzeichen getrennt! Die physikalische Einheit darf nicht in kursiver Schrift dargestellt werden³ Erlaubt: 9,81 m/s², R = 8,314 J/(mol·K), l = 3 mmNicht erlaubt: 9,81m/s², R = 8,314J/molK, l = 3mm

Tabellen

Bei Tabellen haben Sie eine gewisse Gestaltungsfreiheit. Das Ziel sollte stets sein, die Zahlenkolonnen möglichst übersichtlich und strukturiert zu organisieren.

WICHTIG

Generell gelten für Tabellen folgende Grundsätze:

- Benutzen Sie ein einheitliches Schriftbild (Schriftart, Schriftgröße, Schriftschnitt).
- In die Kopfzeile gehören die physikalischen Größen und Einheiten, in den Tabellenkörper die Zahlen. Der Text in der Kopfzeile ist zur besseren Lesbarkeit fett hervorgehoben.
- Falls Sie Formelzeichen wie c_w, c_0, c, C, c_{Blei} verwenden, müssen Sie im Textkörper oder in der Tabellenüberschrift die Bedeutung dieser Größen mindestens einmal aufführen.
- Die Zahlen in der Tabelle müssen sinnvoll gerundet werden. Siehe Abschnitt Angabe von Fehlern, Rundungsregeln.
 Beispiel: 4,24761293674 → 4,2 bzw. bei Berechnungen oder Zwischenergebnissen die Zahl 4,25 oder 4,248 verwenden. Hier müssen Sie selbst entscheiden, welche Präzision benötigt
- wird.
 Vermeiden Sie die unformatierte Ingenieurschreibweisen wie z. B. 1,00746329E+10.
 Manchmal ist es sinnvoll, eine sehr kleine Größe in dieser Schreibweise anzugeben.
 Beispiel: Plancksches Wirkungsquantum h = 6,63E-32 J·s. Besser wäre eine Darstellung in der
- Exponentialschreibweise: $h = 6,63 \cdot 10^{-32}$ J·s.
- Beschriften Sie Ihre Tabellen mit einer Tabellenüberschrift. Es ist im Rahmen des Physiklabors nicht notwendig, aber prinzipiell werden Tabellen mit einer Tabellenüberschrift versehen. Ich habe dies in Abbildung 9 angedeutet.
- Tabellenrahmen nicht vergessen. Zellengrößen sinnvoll anpassen.
 Wenn Sie sich nicht sicher sind, welchen Rahmen Sie verwenden sollen, nutzen Sie die Option "Alle Rahmenlinien" .

³ Sorry, ich habe es mir nicht ausgedacht. Auch die Messtechnik hat ihre Grammatik. Ausführliche Informationen zum Umgang mit SI-Einheiten finden Sie <u>hier</u>. Die Trennung der Maßzahl und der Einheit durch ein Leerzeichen ist Pflicht!

Tabelle 1 Messwertetabelle zum Versuch "Messbereichserweiterung".							
	MB/V	U _v /V	$\Delta U_{\rm v}/{\rm V}$	<i>Ι</i> _ν /μΑ	Δ <i>Ι</i> _ν /μΑ	<i>R</i> _i /kΩ	
	0,1	0,1	0,0025	50	3,75	2,0	
	1	1	0,015	50	3,75	20,0	
	3	3	0,045	52,5	3,75	57,14	
	10	10	0,15	50	3,75	200	
	30	13	0,45	20	3,75	650	
MB: Messbereich des Voltmeters, U _v : Angelegte Spannung am							
Voltmeter, ΔU_{v} : Fehler von U_{v} , I_{v} : Angelegter Strom am Voltmeter, ΔI_{v} :							
Fehle	er von I _v , R	_i : Innenwi	derstand de	es Voltmet	ers		

Abbildung 9 Positivbeispiel einer Tabelle mit Überschrift. Der Text im Tabellenkopf ist durch Fettschrift hervorgehoben. Die Bedeutung der physikalischen Größen muss separat angegeben werden, falls nicht vorhanden.

	MB	U_V [V]	∆U_V [V]	I_V/μA	∆I_V/A	Ri/Ohm
0,1		0,1	0,0025	50,28741	3,75 μ	2,0 k
1		1	0,015	50,28741	3,75 μ	20,0 k
		3	0,045	52,5	3,75 μ	57,14 k
10		10	0,15	50,28741	3,75 μ	0,20 MΩ
30		13	0,45	20,09	3,75 μ	0,65 MΩ

Abbildung 10 Negativbeispiel einer Tabelle. Welche Mängel diese Tabelle besitzt, steht im nachfolgenden Text.

In Abbildung 10 ist ein negatives Beispiel einer Tabelle dargestellt. Gehen wir die Mängelliste durch:

- Tabellenkopf (= die Zeile mit der Spaltenüberschrift)
 - Die physikalische Einheit Ohm (Ω) ist ausgeschrieben.
 An sich legitim, jedoch sollte man die Möglichkeiten einer modernen
 Textverarbeitung nutzen und sich um eine korrekte Darstellung der Einheiten bemühen.
 - Die Indizes (tiefgestellte Notationen) sind nicht in Ordnung.
 Die Schreibweise A_B kann man als A_B interpretieren. Das ist legitim, sieht aber nicht besonders gut aus. Bei Ri hätte es konsequenterweise R_i heißen müssen.
 - Die Ausrichtung des Texts im Tabellenkopf ist rechtsbündig, im Tabellenkörper linksund rechtsbündig. Besser wäre es, alle Inhalte zu zentrieren.
- Tabellenkörper
 - Die Ausrichtung der Zahlen ist nicht in Ordnung.
 - Entweder alle Zelleninhalte rechtsbündig oder linksbündig ausrichten.
 - Es fehlt ein Tabellenrahmen.
 Ohne Rahmen ist die Lesbarkeit schlechter. Sie können ihn in bestimmten Fällen weglassen, aber achten Sie darauf, dass die Tabellenwerte eindeutig identifiziert werden können.
 - In der Spalte zu MB fehlt ein Wert.
 - In der Spalte zu I_V sind die Zahlen nicht gerundet.
 - Die Zellengröße sollte kleiner gewählt werden. Die Tabelle nimmt sehr viel Platz auf dem Papier ein.
 - \circ In der letzten Spalte sollten die SI-Präfixe wie k und M nicht in der dargestellten Form verwendet werden. Die Verwendung von M Ω ist falsch.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Student (bzw. der Autor...) sich keine Mühe bei der Formatierung der Tabelle gemacht hat. Mit ein paar Mausklicks lässt sich so etwas schnell beheben.

Abstand	Spannung	S
	1,600000	1,500E+00
	2,8000000	2,300E+00
	4,4000000	4,000E+00
	6,900000	6,400E+00

Ein weiteres Negativbeispiel stellt die folgende Tabelle dar:

Abbildung 11 Leider ist diese Darstellung nicht eindeutig und auch nicht übersichtlich. Es fehlen Elemente wie Rahmen, physikalische Größen, Einheiten sowie eine sinnvolle Ausrichtung des Texts. Die Zahlenformate sind falsch.

Weitere (positive) Beispiele für Tabellen finden Sie in den nachfolgenden Abbildungen.

Ν	Poti-Skala [Skt]	U ₀ [V]	U ₂ [V]	Kommentar				
1	0	10,00	9,95	Start der Messung				
2	50	10,07	6,48					
3	100	10,08	4,74					
4	150	10,14	3,73	Messung beendet				
Skt: Skalenteile, U ₀ : Anfangsspannung, U ₂ : Spannung am Widerstand R_2								

Abbildung 12 Tabelle mit einer Messwertnummer- und Kommentarspalte. Die Erklärung der Formelzeichen unterhalb der Tabelle ist nicht notwendig, wenn diese an einer früheren Stelle im Text erwähnt wurden.

SZ-Modul	U _{oc} /V	I _{sc} /A	$U_{\rm MPP}/V$	I _{MPP} /A
CIGS	21,8	0,1267	8,9	0,0830
Amorphes Si	20,8	0,0202	12,7	0,0091
Monokristallines Si	18,4	0,1821	14,7	0,1747
Polykristallines Si	19,3	0,1771	17,5	0,1527

Abbildung 13 In der Literatur bzw. wissenschaftlichen Publikationen findet man oft Tabellen, die nur horizontale Linien über/unter dem Tabellenkopf und am Tabellenende enthalten. Auf horizontale Linien sowie Rahmen wird verzichtet. An sich eine sehr schöne und übersichtliche Tabelle, welche Sie eventuell in Ihrer Bachelorarbeit verwenden werden.

Messwert-Nr.	Gemessene Schwingungsdauer von 20 Perioden, 20·T in s	Schwingungsdauer einer Periode, T in s
1	19,2	1,92
2	19,1	1,91
3	18,9	1,89
4	19,1	1,91
5	19,1	1,91
Mittelwert	19,08	1,908

Abbildung 14 Beispiel einer Tabelle mit Text im Tabellenkopf. Die mittlere Spalte enthält Messwerte, die rechte Spalte sowie die unterste Zeile enthalten die berechneten Werte. Die dicke, horizontale Linie ist optional. Ein kleiner Nachteil bei diesem Tabellentyp ist, dass der Text im Tabellenkopf viel Platz einnimmt.

Anzahl der Schwingungen	A _{li} /Skt Messung 1	A _{li} /Skt Messung 2	A _{re} /Skt Messung 1	A _{re} /Skt Messung 2
5	17,2	16,8	16,9	17,0
10	16,3	16,4	16,2	16,2
15	16	15,3	15,6	15,6
20	15,1	15,3	15,1	15,1

Abbildung 15 Microsoft Word bietet Ihnen auch Vorlagen für verschiedene Tabellenformate. Die Tabellen sehen etwas hübscher aus. Wählen Sie am besten ein Design aus, welches einen hohen Kontrast besitzt (z. B. Schwarz oder ein dunkleres Blau). Farben wie Grün oder Gelb haben einen geringen Kontrast und erschweren die Lesbarkeit, wie in der obigen Tabelle dargestellt. Auf eine Beschreibung der Formelzeichen wurde hierbei verzichtet.

Ich hoffe, dass Ihnen die hier gezeigten Beispiele eine gute Vorstellung geben, wie eine Tabelle in einer Ausarbeitung aussehen könnte. Sie können gerne Ihre eigenen Designs verwenden – allerdings sollten Sie die <u>Gestaltungsvorschläge</u> mitberücksichtigen. Falls Sie sich in der Hinsicht unsicher sind, sprechen Sie Ihren Tutor oder Dozenten an.

Abbildungen und Grafiken

Bestimmt kennen Sie den Spruch: "Ein Bild sagt mehr als tausend Worte". Nun ja, realistischer wäre die Aussage: "Ein gutes Bild erspart Ihnen mehr als tausend Worte". Es ist ein wichtiges Hilfsmittel in allen Ingenieurs- und Naturwissenschaften. Mit einem Bild können Sie komplizierte Sachverhalte sehr anschaulich darstellen aber auch sehr viel falsch machen. Von daher legen wir sehr viel Wert auf eine "ordentliche" Darstellung, die sich nach einigen wichtigen Grundprinzipien richtet.

Im Rahmen des Physiklabors werden ihnen vermutlich drei Typen von Abbildungen begegnen:

- Skizzen und schematische Darstellungen
- Diagramme (Temperatur-Zeit, Spannungs-Zeit, Strom-Spannungs-, Weg-Zeit-Diagramme und andere)
- Fotos (Bilder, Screenshots)

Im Verlauf des Studiums werden Sie verschiedene technische Zeichnungen kennen lernen wie 2Dbzw. 3D-Konstruktionszeichnungen oder PCB-Layouts. Diese sind jedoch nicht der Gegenstand dieser Anleitung.

Skizzen und schematische Darstellungen

Skizzen bzw. schematische Darstellungen dienen der Visualisierung einer Problemstellung. Die Skizze können Sie entweder per Hand zeichnen oder mit einem Zeichenprogramm am PC anfertigen.

Die erstere Variante (Handskizze) geht deutlich schneller und sie können das Bild mithilfe eines Scanners in Ihr Textdokument einpflegen. Falls Sie keinen Scanner besitzen, können Sie an der FH SWF unsere Kopierer mit Scanfunktion benutzen. Die Kopierer befinden sich in der Bibliothek sowie in den Kopierräumen in Gebäude 1. Sie benötigen lediglich eine Kopierkarte und einen USB-Stick, um die eingescannten Dateien darauf zu abzuspeichern.

Die zweite Variante (Skizze am PC) kann etwas komplizierter sein, allerdings lassen sich damit mit viel Übung und Geduld bessere Ergebnisse erzielen als mit einer Handskizze. Zudem lassen sich digital erstellte Skizzen nachbearbeiten, kopieren und austauschen.

Handskizze

Bei Ihren persönlichen Handskizzen haben Sie die völlige Gestaltungsfreiheit. Sie dürfen schmieren, streichen, malen und beschriften. Aus der Praxis kann ich Ihnen folgende Tipps geben:

- Benutzen Sie einen Bleistift und Lineal/Geodreieck zum Zeichnen. Zeichenfehler lassen sich sehr einfach mit einem Radiergummi korrigieren.
- Falls Sie Ihre Skizzen bunt mögen: benutzen Sie Buntstifte. Prinzipiell können Sie eine Farbpalette von 32 Farben oder mehr mitbringen. In der Regel reichen vier Farben⁴, wobei die Farben Rot, Grün, Blau und X (X = Schwarz, Orange, Violett, ...) empfohlen sind. Warum? Siehe Fußnote!
- Falls Sie Fasermaler benutzen: beachten Sie, dass die Farbe das Blatt durchdringen kann.
- Falls Sie Ihre Skizze einscannen möchten:
 - Nutzen Sie sehr kontrastreiche Farben (Schwarz auf weißem Hintergrund).
 - Die eingescannte Auflösung sollte 600 dpi betragen. 300 dpi reichen prinzipiell aus, falls Sie die Dokumente auf eine bestimmte Größe komprimieren müssen.
 - Speichern Sie das Bild immer in einem unkomprimierten Format (PNG, TIFF, BMP).
 Diese Rohbilder können Sie im Anschluss in komprimierte Bilder (JPEG) umwandeln, sofern die Dateigröße eine Rolle spielt (z. B. wenn Sie etwas per E-Mail verschicken möchten und die Dateigröße maximal 20 MB betragen soll).
 - Falls Ihre Skizze keine besondere Farbinformationen enthält, benutzen Sie als Bildtyp "Graustufenbild" oder "Schwarzweißbild".
 - Mit dem Programm Inkscape lassen sich Bitmap-Grafiken in Vektorgrafiken <u>umwandeln</u>. Vektorgrafiken sind verlustfrei skalierbar und haben kleine Dateigrößen.

WICHTIG

Sobald Sie die Skizze in die Ausarbeitung übertragen wollen, beachten Sie folgende wichtige Regeln:

- Beschriften bzw. bemaßen Sie die wesentlichen Elemente
- Zeichnen Sie sauber und ordentlich
- Verwenden Sie eine leserliche Schrift
- Skalieren Sie das Bild so, dass alle Details deutlich sichtbar werden
- Scannen Sie Bilder mit einem möglichst hohen Kontrast ein (S/W bzw. Graustufe)
- Das in MS Word eingefügte Bild benötigt eine Bildunterschrift (analog zur Tabelle)
- Bei Verwendung von Fremdbildern (z. B. aus einem Buch oder aus dem Internet) ist eine Quellenangabe notwendig

⁴ Warum gerade 4 Farben und nicht 3, 5 oder 64? Es gibt ein sogenanntes Vier-Farben-Theorem. Dieses besagt, dass maximal vier Farben ausreichen, um eine Landkarte so einzufärben, dass benachbarte Flächen niemals die gleiche Farbe besitzen. Siehe <u>Wikipedia-Artikel</u>. Sie zeichnen während des Praktikums zwar keine Landkarten, aber wenn Sie beispielsweise Flächen mit Farben füllen wollen, dann werden Sie Ihr Kontingent an Farben niemals erschöpfen.

Beispiele für eingescannte Handskizzen



Abbildung 16 Negativbeispiel: Handskizze zum Versuch "Bestimmung der Dichte von Festkörpern". Dis Skizze zeigt das Prinzip des Versuchs, allerdings fehlet die Beschriftung der Komponenten (Balkenwaage, Festkörper, Gewichte, Becherglas, Wasser). Diese Skizze sollte nicht in dieser Form in eine Ausarbeitung übernommen werden. Graustufenscan bei 300 dpi.



Abbildung 17 Ein Beispiel einer Handskizze zum Versuch "Magnetfeldmessung". Gezeigt wird der schematische Aufbau der Messung, bei dem eine Axialfeldsonde entlang der Achse des Helmholtz-Spulenpaares bewegt wurde. Das Teslameter (T) registriert die magnetische Flußdichte. Der Kontrast dieses Bildes ist nicht besonders hoch. Graustufenscan bei 300 dpi.



Abbildung 18 Skizze zur Bestimmung der Fadenlänge (Versuch SW3). Farbscan bei 300 dpi. Hier sind die wesentlichen Größen bemaßt, sodass sich die Fadenlänge von der Aufhängung bis zur Mitte der Kugel sehr leicht ermitteln lässt. Der Kugelradius ist in dieser Skizze nicht angegeben. Der Kontrast dieses Farbscans ist nicht sehr hoch, sodass ein S/W-Ausdruck sehr blass wirkt und schwer lesbar ist. Der Kontrast muss nachträglich erhöht werden.



Abbildung 19 Eine sehr einfache Skizze einer Hochpass-Schaltung, entnommen aus Abbildung 2. S/W Scan bei 600 dpi. Diese Abbildung hat den höchsten Kontrast und lässt sich sehr gut ausdrucken.

Skizze am PC

Die Regeln für eine PC-Skizze sind die gleichen wie bei der Erstellung einer Handskizze. Die Bilder werden mit einem Programm wie Inkscape oder MS PowerPoint gezeichnet und im entsprechenden Format gespeichert (bei Inkscape ist es SVG, bei PowerPoint PPTX).

Um Bilder von Inkscape in MS Word einfügen zu können, müssen Sie die Grafik in Inkscape als PNG mit einer möglichst hohen Auflösung exportieren (>600 dpi) und anschließend in MS Word einfügen. Änderungen können Sie Änderungen nur an der SVG-Datei durchführen. Etwas umständlich, aber es führt zu einem brauchbaren Ergebnis.

Mit PowerPoint erstellten Folien lassen sich direkt in MS Word kopieren. Es nimmt Ihnen die Arbeit mit dem Exportieren ab, aber es kann durchaus zu Kompatibilitätsproblemen kommen, falls Sie mit verschiedenen PowerPoint Versionen arbeiten. Das Layout des Bildes kann sich verändern und Sie müssen in mühsamer Kleinarbeit den alten Zustand wiederherstellen. Einen Vorteil gegenüber Inkscape hat PowerPoint dennoch: es besitzt einen Formeleditor, der durchaus sinnvoll sein kann.

Probieren Sie es aus. Es gibt kein Patentrezept auf "Wie erstelle ich mit dem PC eine Grafik". Sie werden früher oder später feststellen, dass jedes Programm Vor- und Nachteile hat. Welche Kompromisse Sie dabei eingehen werden, bleibt Ihnen überlassen.

An dieser Stelle möchte ich Ihnen gerne noch die Unterschiede zwischen einer Bitmap-Grafik und einer Vektorgrafik demonstrieren. Dazu wurde die Schaltung aus Abbildung 19 mithilfe des Programms Inkscape gezeichnet und in "low resolution" PNG sowie EPS exportiert. Den Vergleich beider Formate sehen Sie in Abbildung 20 und Abbildung 21. Typische Vektorgrafik-Formate sind EPS, SVG oder EMF, wobei MS Word (ab Version 2010) nur EPS und WMF/EMF-Formate unterstützt.



Abbildung 20 Computerskizze im Rastergrafik-Format (PNG). Man sieht deutliche Qualitätsverluste beim Hochskalieren der Grafik. Für ein besseres Ergebnis wird eine höhere Auflösung (>300 dpi) benötigt.

Abbildung 21 Die obige Grafik wurde im Vektorformat Encapsulated Postscript (EPS) gespeichert. Sie lässt sich beliebig skalieren ohne Qualitätsverluste.

x-y-Diagramme

Bei der Erstellung von Diagrammen kann man sehr viel falsch machen. Ein Diagramm⁵ ist neben einer technischen Zeichnung das wichtigste grafische Werkzeug eines Ingenieurs. Es dient uns dazu, komplizierte Zusammenhänge bildlich darzustellen. Wichtige Merkmale wie Grenzwerte, Minima, Maxima oder physikalische Zusammenhänge in Form von Regressionsanalysen werden stets hervorgehoben.

WICHTIG

Halten Sie sich unbedingt an die folgenden Grundsätze. Es gibt keine Ausnahmen! Unvollständige Diagramme werden stets bemängelt und eine Korrektur verlangt.

- Das Diagramm muss immer mit einer Überschrift versehen werden
 Die Überschrift sollte kurz und prägnant sein, damit der Leser weiß, womit er es zu tun hat.
 Beispiel: "Temperatur-Zeit-Verlauf von X" oder "Weg-Zeit-Diagramm eines fallenden
 Gegenstandes"
- Datenpunkte müssen gut erkennbar und voneinander unterscheidbar sein Datenpunkte können als Kreis ○, Kreuz ×, Stern *, Plus +, Quadrat □, Punkt ●, Dreieck △ oder Raute ◊ dargestellt werden. Die Symbole sollten sich nach Möglichkeit nicht überlagern oder von einer Regressionsgeraden überdeckt werden. Passen Sie die Größe der Symbole entsprechend an.
- Die Achsen müssen immer beschriftet werden
 Bei der Beschriftung der Achsen werden die physikalische Größe und die Einheit angegeben.
 Bei Platzmangel reicht die Kurzform, z. B. "x/m". Beispiele für erlaubte Beschriftungen:
 - o x/m, s/cm, A/m², F/N
 - \circ x [m], s [cm], A [m²], F [N]
 - Abstand x in m, Weg s in cm, Fläche A in m², Kraft F in N
 - Abstand x/m, Weg s/cm, Fläche A/m², Kraft F/N

Nicht erlaubt wären Einheiten ohne die physikalische Größe, z. B. x, s, A und F oder m, cm, m² oder N. Bei m wäre es nicht eindeutig, ob es sich um die physikalische Größe einer Masse handelt oder um eine Längenangabe in Meter. Das Gleiche gilt für s (Strecke oder Sekunde?)

- Die Skalierung der Achsen (min/max) muss so gewählt werden, dass die Datenpunkte über den gesamten Wertebereich verteilt sind. Es ergibt wenig Sinn, wenn Sie Ihre Achse von 0 bis 1000 wählen, Ihre Messpunkte jedoch nur im Intervall 200 bis 500 liegen. In den Achsenoptionen des Diagramms lässt sich dies anpassen.
- Die Haupt- und Hilfsintervalle müssen sinnvoll gewählt werden Legen Sie die Haupt- und Hilfsintervalle so fest, dass man die Zahlenwerte der Messpunkte an den x- und y-Achsen ablesen kann.
- Bei mehreren Datensätzen in einem Diagramm: Legende hinzufügen und sinnvoll beschriften Bei einem Diagramm, in dem Sie nur eine Messung eingetragen haben, kann die Legende weggelassen werden. Bei mehreren Messpunkten bzw. bei der Kombination der Messpunkte mit einer Regressionsgeraden wird hingegen eine Legende benötigt. Positionieren Sie die Legende im Diagramm so, dass sie nicht stört (z. B. in eine der Ecken) aber dennoch gut sichtbar ist. Achten Sie auf die Beschriftung aller Symbole und Fitgeraden.
- Die Messpunkte dürfen <u>nicht</u> mit Linien miteinander verbunden werden Benutzen Sie *auf keinen Fall* eine Spline-Interpolation! Sie dürfen den Kurvenverlauf mit einem Bleistift andeuten, allerdings ist das Verbinden von Messpunkten nicht erlaubt. Der Grund hierfür wird im Anhang anschaulich erläutert. Siehe dazu:

⁵ Häufig benutzt man das Wort "Plot" oder "plotten", wenn es um grafische Darstellungen geht.

Anleitung zur Regression nach der "Methode der kleinsten Quadrate" in Excel

- Das Diagramm wird stets mit einer Bildunterschrift versehen (*Abbildung xy: Text* ...) In der Bildunterschrift steht eine kurze Erklärung zur Abbildung.
- Die Zeichnungsfläche ist stets weiß, d. h. keine Farbfüllungen oder Gradienten Verzichten Sie auf einen bunten Hintergrund oder sonstige Muster.
- Falls Sie eine lineare/nichtlineare Regression durchführen ("Ausgleichskurve" bzw. "Fit"): die Bestimmungsgleichung (z. B. y = mx + b) sowie das Bestimmtheitsmaß (R²) gehören immer mit zum Diagramm.
- Die Längenmaße eines Diagramms (B x H inkl. Bildunterschrift) sollten auf einer DIN A4 Seite im Hochformat etwa (16 cm x 11 cm) betragen. Bei ganzseitig ausgedruckten Diagrammen nutzen Sie die volle Fläche (25 cm x 15 cm) des DIN A4-Blattes im Querformat aus.
- Achten Sie auf Rechtschreibfehler sowie inhaltliche Fehler.
- Falls möglich: Stellen Sie mehrere Datensätze in einem Diagramm dar versuchen Sie nicht mehrere Einzeldiagramme anzufertigen (außer es wird explizit gefordert)!

Stilfragen zu Strichdicken, Linienformen, Farben, Gitternetzlinien oder Schriftarten, welche zur optischen Aufwertung eines Diagrammes führen können, sind im Rahmen des Physiklabors von untergeordneter Bedeutung. Diesbezüglich fragen Sie am besten Ihren Dozenten.

Tipp: Oft werden Sie lesen, dass Sie beispielsweise "Temperatur über Zeit" oder "Weg über Zeit" auftragen sollen. Damit ist gemeint, dass Sie die Temperaturwerte auf die y-Achse (Ordinate, vertikale Achse) und die Zeitwerte auf die x-Achse (Abszisse, horizontale Achse) auftragen sollen. Das gleiche gilt bei anderen physikalischen Größen wie "Leistung über Spannung" bzw. "P über U" oder beim "P-U-Diagramm".

Im nachfolgenden Abschnitt sind einige Beispiele für verschiedene Diagramme aufgeführt, welche Ihnen im Rahmen des Physiklabors begegnen werden.



Negativbeispiel 1: Diagramm mit vielen äußerlichen Mängeln

Abbildung 22 Negativbeispiel eines Diagramms bezüglich der Größe, Achsenbeschriftung, Diagrammtitels, Legende und Datenpunkte. Können Sie etwas damit anfangen?

Das obige Diagramm (Abbildung 22) bezieht sich auf den Versuch "Bestimmung des Adiabatenexponenten der Luft". Aufgetragen ist eine Höhendifferenz $(h_2 - h_1)$ in mm über einem Gasvolumen V in ml. Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden soll der sogenannte Adiabatenexponent bestimmt werden. Nun ja, wie Sie sehen können, hat dieses Diagramm erhebliche Mängel:

- Bei der Achsenbeschriftung fehlen die Einheiten
- Der Diagrammtitel hat keine Aussagekraft
- Datenpunkte sind miteinander verbunden (sog. Spline-Interpolation)
- Die Legende ist überflüssig, nimmt Platz weg und hat keine Aussagekraft
- Keine Regressionsgerade/Regressionsparameter vorhanden, da ein linearer Zusammenhang vorhanden ist
- Das Diagramm ist zu klein





Abbildung 23 Negativbeispiel eines Diagramms bezüglich der Achsenskalierung, Legende und der Regressionsgeraden.

In diesem Diagramm (Abbildung 23) wurden viele Sachen im Vergleich zum Diagramm aus Abbildung 22 verbessert, allerdings gibt es einige erhebliche Mängel:

- Der Wertebereich der x-Achse ist in Ordnung, allerdings ist die Einteilung der Hauptstriche nicht gut. Messwerte lassen sich nur mühsam ablesen.
- Es wurde eine lineare Regression durchgeführt, wo es offenbar gar keinen linearen Zusammenhang gibt. Das ist falsch.
- Es fehlt eine Legende, auch wenn die Regression fehlerhaft ist.
- Die Achsenbeschriftung ist nicht die beste, aber tolerierbar.
- Die Textbox mit den Regressionsparametern ist schlecht platziert. Sie darf keinesfalls die Gerade oder die Messpunkte überlagern.
- Rechtschreibfehler in der Überschrift: Korrekt wäre die Bezeichnung "Lastwiderstand" statt "Lastwiederstand".

Negativbeispiel 3: Ausreißer und falsche Skalierung



Abbildung 24 Dieses Diagramm enthält eine ungünstige Achsenskalierung sowie einen Ausreißer, der durch einen Tippfehler entstanden ist. Der Diagrammtitel ist etwas irreführend.

In diesem Diagramm gibt es drei Mängel:

- Die x- und y-Achsenskalierung ist schlecht gewählt.
 Besser wäre es, die x-Achse im Bereich von 0 cm bis 60 cm darzustellen und die y- Achse im Bereich von 0 N bis 0,7 N. Damit würde man die Zeichnungsfläche besser ausnützen.
- Der Messpunkt bei r = 40 cm "springt aus der Reihe".
 Zunächst einmal eine offensichtliche Beobachtung: der Trend der Messpunkte ist abnehmend, d. h. mit steigendem Abstand r geht die Kraft F gegen Null.
 Es handelt sich entweder um einen "echten" Ausreißer, d. h. dieser wurde tatsächlich gemessen, oder es handelt sich um einen Tippfehler. In diesem Falle war es ein Tippfehler, wobei der wahre Wert 0,08 N haben sollte und nicht 0,8 N. Bitte achten Sie auf solche Fehler in Ihrer Auswertung. "Echte" Ausreißer werden in eine Klammer () gesetzt.
- Der Diagrammtitel ist irreführend bzw. falsch.
 Aus diesem Diagramm lässt sich (noch) nichts bestimmen. Zur Bestimmung des Direktionsmoments müsste man die Kraft F über dem Kehrwert von r, also 1/r, auftragen.
 Anschließend würde man eine Regression durchführen und aus der Steigung der Geraden das Direktionsmoment bestimmen. Das obige Diagramm zeigt lediglich den gemessenen Zusammenhang zwischen Kraft und der Länge des Kraftarms.

Positivbeispiel 1: Weg-Zeit-Diagramm



Abbildung 25 Beispiel für ein Weg-Zeit-Diagramm mit linearer Regression .

Im obigen Diagramm zum Versuch "Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen" sind die Achsen korrekt skaliert und beschriftet. Eine Überschrift ist vorhanden, jedoch etwas irreführend formuliert, da hier kein Steigungsdreieck eingezeichnet wurde (außer es wird nachträglich eingezeichnet – dann wäre es korrekt). Eine bessere Überschrift wäre beispielsweise "Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mithilfe der linearen Regression".

Die Parameter der Regressionsgleichung sind nicht gerundet worden. Eine Angabe der Steigung auf 3 Nachkommastellen ist nicht sinnvoll (hier: 312364509,246 m/s). Akzeptabel wäre eine Angabe von $3,1\cdot10^8$ m/s oder vergleichbar.

Mängelliste

- Die Legende fehlt. Das Diagramm enthält 2 verschiedene Datensätze (Messpunkte und Ausgleichsgerade), die aufgeführt werden müssen.
- Sofern im Experiment aufgetreten: in dem obigen Diagramm fehlen die eingezeichneten Ausreißer. Siehe Abschnitt *Umgang mit Ausreißern.*

Positivbeispiel 2: Temperatur-Zeit-Diagramm



Abbildung 26 Beispiel für ein Temperatur-Zeit-Diagramm mit zusätzlicher Beschriftung.

Bei diesem Diagramm zum Versuch "Spezifische Wärme von Metallen und Festkörpern" sind die geforderten Kriterien erfüllt. Die Achsen sind korrekt beschriftet, die Skalierung der Achsen ist in Ordnung und die Haupt- und Hilfsintervalle sind so gewählt, dass man die Werte ablesen kann. Es wurden zusätzliche Textfelder eingefügt, um die jeweiligen Kurvenabschnitte zu benennen (Vorkurve, Hauptkurve, Nachkurve). Eine Legende ist nicht notwendig, da nur Temperaturmesswerte eingetragen wurden. Die vertikalen Linien sind extra eingezeichnet worden, um die jeweiligen Intervalle anzudeuten.

Positivbeispiel 3: Einfach-logarithmische Darstellung

Die einfach-Logarithmische Darstellung wird benötigt, sobald sich Messwerte in einem Bereich über mehrere Zehnerpotenzen erstrecken. Also z. B. von 1 mV bis 1 V. Das wären 3 Zehnerpotenzen (auch Größenordnungen genannt), da 1 mV = $1 \cdot 10^{-3}$ V und 1 V = $1 \cdot 10^{0}$ V entspricht. Dies ist beispielsweise im Versuch "Kondensatorentladung" der Fall. Die Entladungskurve folgt einem exponentiellen Abfall wie im nachfolgenden Diagramm dargestellt.



Abbildung 27 Beispiel für eine einfach-logarithmische Darstellung. Die y-Achse ist logarithmisch aufgetragen.

Das obige Diagramm besitzt keine besonderen inhaltlichen Mängel. Optisch sieht das Diagramm nicht sehr schön aus, da es in der Vertikalen gestaucht worden ist. Die Achsen sind in Ordnung, das Diagramm besitzt eine Legende, ein Feld mit der Bestimmungsgleichung und dem Bestimmtheitsmaß sowie eine Überschrift. Die Regressionsparameter sind mit vielen Nachkommastellen angegeben, welche man hätte sinnvoll runden können. Zusätzlich wurde der y-Achse ein Hilfsgitternetz hinzugefügt, um die Ablesbarkeit der Messdaten zu erleichtern.





Abbildung 28 Beispiel für ein etwas umfangreicheres Diagramm aus Versuch E1.

Das Diagramm in Abbildung 28 enthält Messdaten aus mehreren Messungen sowie mehrere Regressionsgeraden inklusive Regressionsparameter. Eine umfangreiche Legende hilft, die Daten voneinander zu trennen, allerdings ist hier die Farbinformation über die Regressionsgeraden verloren gegangen! Eventuell muss man hier auf andere Linienformate wie "gestrichelt - - -, oder "punktförmig" ausweichen. Das Diagramm ist in schwarzer Farbe dargestellt, sodass der Ausdruck auf dem Papier einen möglichst hohen Kontrast besitzt.

Diagramme auf dem Millimeterpapier

Sollten Sie sich für eine handschriftliche Ausarbeitung entscheiden, so können Sie Ihre Diagramme auf dem Millimeterpapier auftragen. Das Millimeterpapier müssen Sie nicht extra kaufen, denn im Internet gibt es entsprechende Druckvorlagen. Sie drucken sich Ihr Millimeterpapier auf einem DIN-A4 Blatt aus. Für die Gestaltung der Diagramme auf dem Millimeterpapier gelten dieselben Regeln wie bei den computergenerierten. Hierzu gibt es ein Beispiel im Abschnitt *Lineare Regression auf dem Millimeterpapier*.

Fotos, Screenshots etc.

Heutzutage besitzen nahezu alle Studenten ein Smartphone mit einer guten Kamera. Bei günstigen Lichtbedingungen lassen sich qualitativ hochwertige Fotoaufnahmen machen. Falls Sie Fotos von Aufbauten in Ihre Ausarbeitung übernehmen möchten, achten Sie bitte auf die folgenden Punkte:

- Fotografieren Sie nur die Gegenstände, die für Ihr Experiment relevant sind. Aufnahmen von anderen Personen sollten vermieden werden.
- Machen Sie stets mehrere Aufnahmen des Aufbaus. Später können Sie die unbrauchbaren Aufnahmen löschen. Verschwommene Aufnahmen sollten nicht verwendet werden.
- Beschriften Sie Ihren Aufbau gemäß Abbildung 30. Nutzen Sie Linien bzw. Pfeile sowie Text, um die wichtigen Komponenten im Bild anzudeuten.
- Falls Sie das Bild nicht in Farbe ausdrucken können: verwandeln Sie es mithilfe eines Grafikprogramms in ein Graustufenbild.
- Vergessen Sie eine Bildunterschrift nicht.
- Machen Sie immer wieder einen Probeausdruck der Seite mit dem Bild. Es gibt nichts Schlimmeres, als beim Ausdruck der finalen Version festzustellen, dass das Bild schlecht aussieht.





Abbildung 29 Versuchsaufbau zum Versuch...? Ohne eine sinnvolle Beschriftung sieht man nur einen unaufgeräumten Arbeitsplatz.

Abbildung 30 Nun sind alle wichtigen Geräte beschriftet. Achten Sie auf einen möglichst hohen Kontrast der Pfeile und des Texts.

Selten hat man ein analoges Messgerät vor sich, wie das Oszilloskop in Abbildung 31. Man ist hauptsächlich an dem Oszillogramm interessiert und nicht an den ganzen Schaltern. Das

Oszillogramm muss man aus dem Bild ausschneiden und die wichtigsten Parameter wie y- und x-Skalierung mit angeben. Der Informationsgehalt sollte maximal sein.



Abbildung 31 Bild eines analogen Oszilloskops. Gemessen wurde mithilfe eines Mikrofons ein verzerrtes Lautsprechersignal bei einer Frequenz von 529 Hz. Der Informationsgehalt dieses Bildes ist zwar hoch, aber nicht alle Einstellparameter sind relevant.



Abbildung 32 Oszillogramm aus Abbildung 31. Die horizontale Zeitskala beträgt 0,5 ms/div und die vertikale Ablenkung 20 mV/div. Hier lassen sich die Periodendauer sowie die Amplitudenwerte ablesen. Die relevanten Parameter wurden aus der Abbildung 31 extrahiert.

Formeln und Gleichungen

Bei Formeln (bzw. Gleichungen) gibt es ebenfalls einige (wenige) Grundregeln, die man beachten sollte. Diese wären:

 Für jede Formel, die Sie in Ihrer Ausarbeitung erwähnen, müssen die physikalischen Größen mindestens einmal im Text genannt worden sein. Als Beispiel kann ich die Formulierung des 2. Newtonschen Gesetzes

$$F = m \cdot a$$

aufführen. Dabei ist F eine Kraft in N, m die Masse in kg und a eine Beschleunigung in m/s². Damit ist die Sache klar und es entstehen keine Unklarheiten, falls Sie diese Größen an einer anderen Stelle schon einmal verwendet haben.

- Bei mehreren Gleichungen müssen diese sinnvoll nummeriert werden. Dazu mehr im Abschnitt <u>Gleichungen nummerieren</u>. Im Prinzip reicht es, eine wichtige Gleichung, auf der Ihre Berechnungen basieren, zu nennen. Bei Herleitungen oder längeren Rechenwegen können Sie auf eine umfassende Nummerierung verzichten.
- Nutzen Sie die "Hochgestellt" bzw. "Tiefgestellt"-Funktion von Word, wenn Sie Formelzeichen mit Indizes versehen wollen. Es sieht einfach besser aus, wenn Sie statt x_2 x₂ bzw. x² x² hinschreiben.

Formeln werden mithilfe eines Formel-Editors in Microsoft Word, PowerPoint sowie Excel erstellt. Den Umgang mit einem Formel-Editor sollten Sie kennenlernen, da Ihre Ausarbeitungen durchaus formellastig sein könnten. Zum Erstellen einer Formel gibt es 2 Möglichkeiten:

1. Sie klicken sich durch. Klicken Sie in der Word-Symbolleiste auf "Einfügen", dann auf die Schaltfläche "Formel". Es erscheint ein Eingabefeld, welches Sie dazu auffordert, eine Formel einzugeben.

Geben Sie hier eine Formel ein.

In dieses Feld geben Sie anschließend Ihre Formel ein. Fertig.

2. Drücken Sie die Tastenkombination **SHIFT + ALT + 0** (die Zahl 0 befindet sich rechts neben der 9 und links neben ß) und schon erscheint das Eingabefeld.

Die 2. Methode ist sehr einfach, schnell und beherrschbar. Als nächstes müssen Sie die gewünschte Formel in das Feld eingeben. Hier gibt es ebenfalls 2 Möglichkeiten: klicken oder tippen. Ich empfehle die 2. Möglichkeit (Befehle tippen). Sie arbeiten wesentlich schneller, wenn Sie die Formelbefehle eintippen.

Beispiel 1: eine einfache Formel aus der Mathematik

- Wir wollen die p-q-Formel mithilfe des Formel-Editors aufschreiben. Dazu drücken wir die Kombination SHIFT + ALT + 0 und erzeugen ein Formel-Eingabefeld. Das Symbol "_" steht für ein Leerzeichen, welches mithilfe der Leertaste erzeugt wird.
- Geben Sie anschließend folgendes ein:

x_1,2 _ = - p/2 _ \pm \sqrt() _
Ergebnis:
$$x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{$$

Bewegen Sie den blinkenden Cursor mit den Pfeiltasten in das Feld innerhalb der Wurzel und geben Sie folgendes ein:

$$p^{-1} = \frac{2}{4} = -q$$

Ergebnis: $x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} - q}$

Damit haben Sie die p-q-Formel mit wenigen Tippbefehlen erstellt. Mit dem Unterstrich "_" können Sie Symbole tiefgestellt anzeigen, z. B. führt der Befehl A_B zu A_B. Der Befehl \pm erstellt das Plusminus Zeichen ±, welches Sie häufig gebrauchen werden. Um einen Exponenten zu erhalten, nutzen Sie ein Zirkumflex "^", beispielsweise liefert e^x _ als Ergebnis e^x. Für die Quadratwurzel nutzt man den Befehl \sqrt _ ... (englisch für square root, also Quadratwurzel). Man muss häufig die Leertaste "_" drücken, um dem Computer mitzuteilen: "wandle meinen Textbefehl in eine Formel um".

Probieren wir es einfach mit einer anderen Formel.

Beispiel 2: Mischungsgleichung aus der Wärmelehre

- Öffnen Sie eine neue Formel mit der Tastenkombination SHIFT + ALT + 0
- Geben Sie folgendes ein:

/ _ Ergebnis: —

• Navigieren Sie mit den Pfeiltasten auf den Zähler und geben Sie folgendes ein:

```
()
```

- Ergebnis: (____
- Schreiben Sie folgendes in die Klammer:

```
m_1 _ T_1 _ + m_2 _ T_2 _
Ergebnis: \frac{(m_1T_1+m_2T_2)}{2}
```

Navigieren Sie den Cursor zum Nenner und geben Sie ein

```
() _ <Pfeil nach links> m_2 _ + m_1 _ 
Ergebnis: \frac{(m_1T_1+m_2T_2)}{(m_2+m_1)}
```

• Nun fehlt noch das Gleichheitszeichen. Klicken Sie mit der Maus vor den Bruchstrich und geben Sie folgendes ein:

 $\label{eq:transform} \begin{array}{ll} \mathbb{T}_{m} & _ & = \\ \mbox{Ergebnis:} \ T_{m} & = \frac{(m_{1}T_{1}+m_{2}T_{2})}{(m_{2}+m_{1})} \end{array}$

• Damit haben Sie die Mischungsgleichung erstellt.

Beispiel 3: Eine etwas kompliziertere Formel

Die folgende Formel stammt aus einer Fehlerrechnung gemäß dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz. Man muss viele Ausdrücke (partielle Ableitungen von c_p nach bestimmten Größen) unter die Wurzel packen und quadrieren. Die Bedeutung dieser Formel spielt zunächst keine Rolle. Das Ergebnis soll so aussehen:

$$\Delta c_p = \sqrt{\left(\frac{\partial c_p}{\partial c} \cdot \Delta c\right)^2 + \left(\frac{\partial c_p}{\partial T_1} \cdot \Delta T_1\right)^2 + \cdots}$$

1. Der Wurzelausdruck wird zunächst in kleine Teile zerlegt. Wir erstellen zunächst das Δc_p und das Wurzelzeichen:

\Delta _ c_p = \sqrt() _ Ergebnis: $\Delta c_p = \sqrt{}$

2. Anschließend klicken wir auf das Feld im Argument der Wurzel und erstellen die Klammer und das Quadrat:

() <u>^</u>2 <u></u>

Ergebnis: $\Delta c_p = \sqrt{(\)^2}$

3. Nun klicken wir auf den Platzhalter innerhalb der Klammer und erzeugen einen Bruch

In den Zähler schreiben wir

\partial _ c_p _
In den Nenner schreiben wir

\partial _ c _ Hinter dem Bruch fügen wir ein \cdot _ \Delta _ c

\cdot _ \Delta _ c Ergebnis: $\Delta c_p = \sqrt{\left(\frac{\partial c_p}{\partial c} \cdot \Delta c\right)^2 *}$

4. Nun bewegen wir den Cursor an die Position des Sternchens * und wiederholen Schritte 2 und 3:

() _ ^2 _

Innerhalb der Klammer eingeben: / _ Im Zähler eingeben: \partial _ c_p _ Im Nenner eingeben: \partial _ T_1 _ Rechts neben dem Bruch eingeben: \cdot _ \Delta _ T_1 _ Ergebnis: $\Delta c_p = \sqrt{\left(\frac{\partial c_p}{\partial c} \cdot \Delta c\right)^2 + \left(\frac{\partial c_p}{\partial T_1} \cdot \Delta T_1\right)^2}$

5. Außerhalb der Klammer folgt die Eingabe: + \ldots _

Ergebnis:
$$\Delta c_p = \sqrt{\left(\frac{\partial c_p}{\partial c} \cdot \Delta c\right)^2 + \left(\frac{\partial c_p}{\partial T_1} \cdot \Delta T_1\right)^2 + \cdots}$$

6. Damit ist die Formel fertig gestellt. Wie man sieht, muss man häufig bestimmte Befehle mit der Leertaste aktivieren. Wenn man den Trick raus hat, macht das Schreiben von Formeln richtig viel Spaß.

Kurze Befehlsreferenz für die Formeleingabe

Im folgenden Abschnitt finden Sie einige nützliche Befehle, die Sie im Rahmen des Physiklabors verwenden können. Das Formelfeld öffnen Sie stets mit der Tastenkombination **SHIFT + ALT + 0**.

Tabelle 3 Griechische Buchstaben, Symbole und ihre Formelbefehle.

Befehl	Symbol	Befehl	Symbol	Befehl	Symbol
\alpha	α	∖iota	ι	\sigma \Sigma	σ,Σ
\beta	β	\kappa	κ	\tau	τ
\gamma \Gamma	γ,Γ	\lambda \Lambda	λ, Λ	\upsilon	υ
\delta \Delta	δ, Δ	\mu	μ	\phi \varphi \Phi	ϕ, φ, Φ
\epsilon \varepsilon	€, ε	\nu	ν	\chi	χ
∖zeta	ζ	\xi \Xi	ξ,Ξ	\psi \Psi	ψ,Ψ
\eta	η	\pi \Pi	π, Π	\omega \Omega	ω, Ω
\theta \vartheta \Theta	θ, ϑ, Θ	\rho \varrho	ρ, ϱ	\hbar \partial	<u>ћ</u> , д

Tabelle 4 Einige Kombinationen von Formelbefehlen.

Befehl	Ergebnis	Befehl	Ergebnis
A_B _	A_B	\sum_(i=1)^ _n _ x_i _	$\sum_{n=1}^{n}$
A_B_C _ L	A _{Bc}		$\sum_{i=1}^{x_i} x_i$
A_B^_C _	A_B^C	\hat ← P	Ŷ
A_123 _	A ₁₂₃	\ddot ← a	ä
A_0 _ \cdot _ e^_kx	$A_0 \cdot e^{kx}$	\vec ← F → = m \cdot _	$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$
<u> </u>		\vec ← a	
e^_(-\delta _ t) _	$e^{-\delta t}$	\partial _ y/\partial _ x _	$\frac{\partial y}{\partial x}$
y = sin_(\omega t)	$y = \sin(\omega t)$	\sqrt \leftarrow a ² +b ² \rightarrow = c	$\sqrt{a^2 + b^2} = c$
\dot ← y = dy/dt	$\dot{y} = \frac{dy}{dy}$	\rightarrow \Rightarrow	$\rightarrow \Rightarrow$
	$y = \frac{1}{dt}$	\leftarrow \Leftarrow	
e = v \times _ B	$e = v \times B$	$\int t_0^{-} t_1 f(t) \rightarrow dt$	$\int_0^t f(t) dt$

Nützliche Hinweise

- Beim Zirkumflex "[^]" müssen Sie zuerst die "Dach-Taste" drücken (links neben der Zahl 1), anschließend die Leertaste ___ betätigen, damit das Symbol ausgegeben wird. Wenn Sie Zirkumflex und einen Buchstaben drücken, z. B. e, dann gibt Ihnen das Programm "ê" aus.
- 2. Bei Akzenten wie \dot{P} oder \hat{P} müssen Sie den Befehl eingeben, die Leertaste _ 2x drücken und anschließend mit der Pfeiltaste nach links \leftarrow den Cursor in das Platzhalter-Feld bewegen.
- 3. Falls Sie sich vertippt haben und Ihre Formel dabei entstellt wird, können Sie die letzte Eingabe mit der Tastenkombination **STRG + Z** jederzeit rückgängig machen und den Vorgang neu wiederholen.

Die obigen Befehle lassen sich ebenfalls in den Textkörper integrieren. So haben Sie die Möglichkeit, den Satz des Pythagoras $a^2 + b^2 = c^2$ oder eine binomische Formel $(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$ in Ihren Text einzubinden. Die griechischen Buchstaben oder Ausdrücke mit tief- und hochgestellten Symbolen wie α_0, ω_0^2 sowie Messergebnisse der Form $g = (\overline{g} \pm \Delta g) \frac{m}{s^2}$ stellen beim Verfassen der Ausarbeitung kein Problem mehr dar.

Eine noch ausführlichere Referenz zum MS Word-Formeleditor finden Sie im Internet (<u>Link</u>) auf der Homepage des Hochschulrechenzentrums der Justus-Liebig-Universität Gießen.

Gleichungen nummerieren

Manchmal könnte es notwendig sein, Ihre Gleichungen und Rechenwege mit Nummern zu versehen, damit man später im Text auf die Stelle verweisen kann. Mit MS Word lassen sich Gleichungen folgendermaßen nummerieren:

1. Erstellen Sie eine Tabelle mit einer Zeile und 3 Spalten wie im Folgenden dargestellt:

2. Ändern Sie die Breite der Zellen wie hier dargestellt. Die Zellen an den Rändern können beispielsweise 1 cm breit sein. Markieren Sie die gesamte Tabelle und setzen den Text auf "zentriert". In den Tabelleneigenschaften sollten Sie die vertikale Ausrichtung auf "zentriert" setzen. Tragen Sie in die rechte Spalte eine Gleichungsnummer und in die mittlere Spalte die Gleichung ein.

$$f(v)dv = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot v^2 \cdot \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$$
(1)

3. Entfernen Sie die Rahmen, sodass Sie nur die Gleichung und ihre Nummerierung sehen.

$$f(v)dv = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot v^2 \cdot \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$$
(1)

Damit haben wir Gleichung (1) hübsch verpackt, auch wenn dies etwas umständlich verläuft. Bei mehreren Gleichungen müssen Sie die Reihenfolge der Nummerierung beachten. Arbeiten Sie mit Copy & Paste, um Zeit mit der Formatierung zu sparen.

Auswertung von Versuchen

Ein typischer Versuch im Rahmen des Physiklabors läuft in der Regel wie folgt ab:

- Sie nehmen am Labortermin teil, sofern Sie sich ausreichend vorbereitet haben (Fragenteil beantworten, Fachgespräch bestehen etc.)
- Sie führen das Experiment durch und dokumentieren alle Messwerte in einem handschriftlich erstellten Messprotokoll
- Diese Messwerte müssen Sie mithilfe von statistischen Hilfsmitteln in einer Ausarbeitung aufarbeiten, d. h.
 - Mittelwerte und Standardabweichungen von physikalischen Messgrößen berechnen
 - Zusammenhänge grafisch darstellen (x-y-Diagramme) und Regressionsanalysen durchführen ("Ausgleichskurve")
 - Mithilfe der Mittelwerte und einer physikalischen Modellgleichung⁶ berechnen Sie Ihren Bestwert
 - Mithilfe von Messunsicherheiten oder abgeschätzten Fehlergrößen sowie eines Fehlerfortpflanzungsgesetzes berechnen Sie den Fehler des Bestwerts
- Sie geben das vollständige Messergebnis in der Form $x = (\overline{x} \pm \Delta x)$ mit einer statistischen Sicherheit (Vertrauensintervall) von 95% an
- Sie geben Ihre Unterlagen mit Ihrer Ausarbeitung rechtzeitig ab und müssen (hoffentlich keine) Korrekturen vornehmen

Der Umfang der Ausarbeitungen beläuft sich in der Regel auf 3-10 Seiten, je nach Aufgabenstellung, Inhalt, Korrekturen usw. Planen Sie für die Auswertung etwas mehr Zeit ein, da Ihnen am Anfang noch die Routine fehlt. Sie werden nach einigen Versuchen feststellen, dass die Auswertung keine Zauberei ist und meist nach einem bestimmten Schema abläuft.

In den nächsten Abschnitten möchte ich Ihnen Tipps für folgende Teilbereiche einer Auswertung geben:

- Rechnung und Zwischenrechnung
- Regressionsanalyse
- Fehlerrechnung
- Angabe des Messergebnisses, Rundung

Einfache Rechnungen und Zwischenrechnungen

Es gelten folgende Grundsätze:

- Ihre Berechnungen müssen nachvollziehbar sein, d. h. alle Rechenschritte sollten aufgeführt werden. Wenn möglich: kommentieren Sie die Rechenschritte stichpunktartig.
- Die Berechnungen können Sie entweder digital oder handschriftlich anfertigen. Handschriftliche Berechnungen können Sie beispielsweise auf ein extra Blatt schreiben, welches Sie mit Datum/Namen und einer Seitennummer versehen sollten. Dieses Blatt wird dann in den Anhang der Ausarbeitung gelegt (als letzte Seite). In der Ausarbeitung müssen Sie auf jeden Fall auf den Anhang verweisen, da unvollständige Berechnungen nicht akzeptiert werden.
- Die physikalischen Einheiten müssen stets mitgeführt werden. Das Endergebnis muss die richtige Einheit haben.

⁶ Für die Bestimmung der Erdbeschleunigung wäre die Modellgleichung gegeben mit $g = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot l_r$. Sie bestimmen g indirekt durch die Messung der Periodendauer T sowie der reduzierten Pendellänge l_r .

- Runden Sie Ihre Ergebnisse auf eine sinnvolle Anzahl von Nachkommastellen
- Das Endergebnis der Rechnung sollten Sie auf jeden Fall vom Rest des Texts hervorheben (z. B. mit fetter Schrift oder unterstreichen).

Beispiel 1: Herleitung der Mischungsgleichung, Berechnung der Mischtemperatur Sie mischen 328 g Wasser bei 62 °C mit 199 g Wasser bei 0,7 °C. Welche Mischtemperatur stellt sich ein?

Bei dieser Aufgabenstellung können Sie einen Rechenansatz präsentieren und die Gleichung für die Mischtemperatur herleiten. Damit zeigen Sie, dass Sie die Aufgabe verstanden haben. Prinzipiell wäre es erlaubt, auf eine Formel im Physikbuch zu verweisen (sofern es die Aufgabenstellung erlaubt). Im folgenden Beispiel soll Ihnen demonstriert werden, wie solch eine Herleitung aussehen könnte.

Erstellen Sie eine zweispaltige Tabelle. Auf der linken Seite können Sie die Rechnung durchführen, auf der rechten Seite können Sie die Schritte kommentieren. Die Kommentare sind optional, im Prinzip reicht der linke Teil (Herleitung) sowie die Berechnung von T_m .

$Q_{auf} = Q_{ab}$	Energieerhaltungssatz: Aufgenommene Wärme ist gleich der abgegebenen Wärme
$m_1 c(T_1 - T_m) = m_2 c(T_m - T_2)$ $m_1 cT_1 - m_1 cT_m = m_2 cT_m - m_2 cT_2$ $m_1 cT_1 + m_2 cT_2 = m_2 cT_m + m_1 cT_m$ $(m_1 T_1 + m_2 T_2) = T_m (m_2 + m_1)$	Umschreiben des Energieerhaltungssatzes Ausmultiplizieren der obigen Gleichung Ordnen der Terme Kürzen von <i>c</i> , Ausklammern von <i>T</i> _m
$\frac{(m_1T_1 + m_2T_2)}{(m_2 + m_1)} = T_m$	Umstellen der Gleichung nach der Mischtemperatur T_m

Als nächstes setzen Sie die Werte in die Gleichung für die Mischtemperatur ein. Achten Sie auf korrekte Einheiten!

$$T_m = \frac{(0,328 \, kg \cdot 335,15 \, K + 0,199 \, kg \cdot 273,85 \, K)}{(0,199 \, kg + 0,328 \, kg)} = \mathbf{312,0} \, \mathbf{K}$$

Die Mischtemperatur beträgt 312,0 K bzw. 38,9 °C.

Beispiel 2: Auswertung einer Längenmessung

Bei der Berechnung von (arithmetischen) Mittelwerten sowie der Standardabweichung müssen Sie keine Zahlen in die jeweilige Gleichung einsetzen. Sinnvoll ist dies bei "kleinen" Rechnungen, wo Sie beispielsweise einen Mittelwert aus 3 Messwerten berechnen müssen. Bei einer größeren Anzahl von Stichprobewerten *i* können Sie das Endergebnis direkt angeben.

Aufgabenstellung: Berechnen Sie den Mittelwert und die Standardabweichung aus der folgenden Längenmessung.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l _i /mm	355,6	355,8	355,5	355 <i>,</i> 6	355,6	355 <i>,</i> 9	355 <i>,</i> 5	355 <i>,</i> 9	355,6

Variante 1 (nicht empfohlen): Ausführliche Rechnung von Zahlenkolonnen

Die folgende Darstellung ist zwar korrekt, wird aber nicht empfohlen. Grund: es ist ein Mehraufwand für Sie, solch eine lange Formel zu schreiben. Der Platz auf dem Papier ist begrenzt und sie könnten sich verrechnen. Falls Sie Ihre Rechenkünste demonstrieren möchten,

$$\overline{l} = \frac{1}{9} \cdot (355,6 + 355,8 + 355,5 + 355,6 + 355,6 + 355,9 + 355,5 + 355,9 + 355,6) \ mm = 355,67 \ mm$$

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{1}{9-1}(355,6 \ mm - 355,7 \ mm)^2 + (355,8 \ mm - 355,7 \ mm)^2 + (355,5 \ mm - 355,7 \ mm)^2 + \cdots} = 0,16 \ mm$$

Variante 2 (empfohlen): Berechnung in der Tabelle

Diese Variante ist sehr anschaulich. Sie haben im Prinzip alle Informationen in einer Tabelle.

i	l _i /mm
1	355,6
2	355,8
3	355,5
4	355,6
5	355,6
6	355,9
7	355,5
8	355,9
9	355,6
Mittelwert \overline{l} in mm	355,67
Standardabweichung Δl in mm	0,16

Variante 3: Ergebnisse gesondert angeben

Sie können die Ergebnisse ggf. gesondert angeben. Schreiben Sie einen kurzen Text dazu, wie Sie vorgegangen sind und verweisen Sie dabei auf Tabelle mit den Zahlenwerten und Gleichungen (2) und (3) im Text. Geben Sie bei mehreren Rechenschritten eventuell notwendige Zwischenergebnisse zur Kontrolle an.

Wertetabelle

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l _i /mm	355,6	355,8	355,5	355,6	355,6	355,9	355,5	355,9	355,6

Zur Berechnung des Mittelwerts \overline{l} und der Standardabweichung σ_l mit n = 9 wurden folgende Gleichungen aus dem Fehlerrechnungsskript verwendet:

$$\overline{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} l_i \tag{2}$$

$$\sigma_{l} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (l_{i} - \bar{l})^{2}}$$
(3)

Ergebnisse der Längenmessung (gerundet):

$\bar{l} = 355, 67 \ mm$ sowie $\sigma_l = 0, 16 \ mm$.

In diesem Fall handelt es sich nur um ein Zwischenergebnis im Rahmen einer Rechenaufgabe, d. h. sie müssen kein Ergebnis in der Form $l = (\overline{l} \pm \Delta l)$ angeben (außer es ist gefordert).

Regressionsanalyse

Die Theorie zur Regressionsanalyse finden Sie in der Literatur und im Internet. Prinzipiell lassen sich Regressionen per Hand oder elektronisch mithilfe einer Wissenschaftlichen Software (Excel, MATLAB, Mathematica, Origin, LibreOffice Calc, GNU R, ...) durchführen.

Zur Durchführung einer Regressionsanalyse⁷ wird eine Modellgleichung benötigt. Einige relevante sowie spezielle Modellgleichungen sind in der Tabelle 5 aufgeführt.

Trendlinientyp	Modellgleichung	Parameter	Anwendung
Linear	y = mx + b	m, b	Weg-Zeit-Diagramme
Exponentiell	$y = A_0 \cdot e^{\lambda x}$	A_0 , λ	Kondensatorentladung, Abkühlungsvorgänge
Quadratisch	$y = A + Bx + Cx^2$	А, В, С	Weg-Zeit-Diagramm bei konstanter Beschleunigung
Polynomial, <i>n</i> -ter Grad	$y = A_1 + A_2 x + A_3 x^2 + \cdots + A_n x^n$	$A_1, A_2, A_3, \dots A_n$ usw.	Potenzfunktion bei $1/r^2$ - Abstandsgesetzen (z. B. in
Logarithmisch	$y = \mathbf{A} \cdot \ln x + B$	А, В	der Optik)
Potenzfunktion	$y = A \cdot x^b$	<i>A</i> , <i>b</i>	

Tabelle 5 Häufig verwendete Modellgleichungen und ihre Parameter.

Einheiten von Fitparametern

Bitte bedenken Sie folgendes: bei der Modellierung von physikalischen Vorgängen haben die Fitparameter stets eine physikalische Einheit. Im Falle der Betrachtung eines Weg-Zeit-Gesetzes mit der Modellgleichung y = mx + b hat die Steigung m die Einheit einer Geschwindigkeit in m/s und der Achsenabschnitt b die Einheit einer Strecke. Die Einheiten der Parameter müssen stets angegeben werden.

Beispiel: Weg-Zeit-Gesetz

Ergebnis einer linearen Regression: x(t) = 3,5t + 0,6Modellgleichung: y = mx + b mit der Steigung $m = 3,5\frac{m}{s}$, Achsenabschnitt b = 0,6 m

Beispiel: Kondensatorentladung

Ergebnis einer exponentiellen Regression: $U(t) = 22.4 \cdot e^{-0.455 \cdot t}$

Modellgleichung: $y = A_0 \cdot e^{\lambda \cdot t}$, Parameter: $A_0 = 22,4 V$ und $\lambda = -0,455 \frac{1}{s}$

Beispiel: Strom-Spannungs-Kennlinie

Ergebnis der Messung: $I(U) = 0.43 \cdot U$

Modellgleichung: y = mx, Parameter: $m = 0.43 \frac{A}{V} \Rightarrow m = 0.43 \frac{1}{\Omega}$

⁷ Häufig wird eine Regression auch "Fit" genannt. "Eine Kurve fitten" bedeute, dass man eine Anpassung vornimmt. Die Parameter in Tabelle 5 werden "Fitparameter" genannt.

Lineare Regression in Excel

einer linearen Regression.

Für das folgende Beispiel wurde die folgende Wertetabelle mit 21 Wertepaaren generiert. Die Werte wurden in dem Diagramm nebenan dargestellt. Nun soll eine Ausgleichsgerade bzw. Trendlinie durch die Messpunkte hindurch gelegt werden.

i	x i	y i	i	x i	y i
1	0	0,39	12	1,1	2,38
2	0,1	0,55	13	1,2	2,70
3	0,2	0,76	14	1,3	2,48
4	0,3	0,98	15	1,4	2,76
5	0,4	1,09	16	1,5	3,00
6	0,5	1,33	17	1,6	3,08
7	0,6	1,44	18	1,7	3,40
8	0,7	1,77	19	1,8	3,39
9	0,8	1,69	20	1,9	3,85
10	0,9	2,17	21	2	4,34
11	1	2,11	-	-	-

Tabelle 6 Wertetabelle zur Durchführung



Abbildung 33 Lineare Regression der Werte aus Tabelle 6.

Hinzufügen einer Trendlinie

Die einfachste Methode zum Hinzufügen einer Trendlinie des Typs y = mx + b ist in Abbildung 34 dargestellt. Wählen Sie im Diagramm die Datenpunkte aus, klicken Sie mit rechter Taste auf sie und wählen Sie im Kontextmenü "Trendlinie hinzufügen". Anschließend können Sie im Menü "Trendlinie formatieren" die Option "Linear" auswählen. Setzen Sie Häkchen bei "Formel im Diagramm anzeigen" und "Bestimmtheitsmaß im Diagramm darstellen". Damit ist die Sache erledigt und das Programm zeichnet Ihnen eine Regressionsgerade (bzw. -kurve) und gibt Ihnen im Diagramm die ausgewählten Informationen aus.



Abbildung 34 Hinzufügen einer Trendlinie in Excel 2013.

Benutzung der Funktion RGP()

Mithilfe der RGP()-Funktion in Excel lassen sich weitere Statistik-Parameter der Regressionsparameter berechnen. Hierzu gehören unter anderem der Fehler der Steigung Δm , der Fehler des Achsenabschnittes Δb , den Standardfehler von y sowie weitere Parameter.

Dazu gehen Sie wie folgend beschrieben vor:

- 1. Markieren Sie in Excel ein Feld aus 2 x 3 Zellen (2 Zellen breit, 3 Zellen hoch).
- 2. Drücken Sie die Taste F2. Es erscheint der Eingabecursor.
- Geben Sie den Befehl =RGP (C2:C22, B2:B22, WAHR, WAHR) wie in der unteren Abbildung ein. Halten Sie SHIFT+STRG gedrückt und drücken Sie die Taste ENTER. Einfaches Drücken von ENTER nach der Befehlseingabe liefert kein Ergebnis. Die B-Spalte enthält die x-Werte, die C-Spalte die y-Werte

20	19	1,8	3,39	
21	20	1,9	3,85	
22	21	2	4,34	
23				
24	=RGP(C2:C22;	B2:B22;WAH	R;WAHR)	
25				
26				
27				

4. Sie bekommen nun das folgende Ergebnis agezeigt:

1,780591029	0,39429733
0,052357549	0,06120834
0,983837548	0,1452863

Die Bedeutung der jeweiligen Zellen ist:

Steigung m	Achsenabschnitt b		
Fehler der Steigung ∆m	Fehler des Achsenabsch. ∆b		
Bestimmtheitsmaß R²	Standardfehler von y		

5. Somit lässt sich das Ergebnis in der Form $y = (m \pm \Delta m)x + (b \pm \Delta b)$ für einen Vertrauensbereich von 68% angeben

$$y = (1,78 \pm 0,05)x + (0,40 \pm 0,06)$$

6. Für einen erweiterten Vertrauensbereich von 95% müsste man den *t*-Faktor für n = 21Messwerte aus einer Tabelle aussuchen. Dieser ist beispielsweise gegeben mit $t_{95\%} = 2,08$. Das Ergebnis lautet dann

$$y = \left(1,78 \pm 2,08 \cdot \frac{0,05}{\sqrt{21}}\right)x + \left(0,40 \pm 2,08 \cdot \frac{0,06}{\sqrt{21}}\right)$$

Lineare Regression auf dem Millimeterpapier

Früher[™], als es noch keine erschwinglichen und leistungsfähigen Computer gab, wurden Diagramme auf dem Millimeterpapier gezeichnet. Es war eine schnelle und einfache Methode zur grafischen Darstellung von Datenpunkten oder Messwerten. Heutzutage werden Diagramme fast ausschließlich mithilfe von PCs erstellt. Dennoch kann es manchmal vorkommen, dass Sie auf die Schnelle ein Diagramm per Hand zeichnen müssen. Wie solch ein Diagramm aussieht, ist in Abbildung 35 dargestellt. Hierbei wurden die Werte aus Tabelle 6 verwendet. Das Ergebnis von $y_{mm} = 1,79x +$ 0,4 stimmt gut mit den Ergebnissen der in Excel durchgeführten linearen Regression mit $y_{XLS} =$ 1,78 ± 0,40 überein. Um ein Diagramm auf dem Millimeterpapier anzufertigen gehen Sie wie folgt vor:

- 1. Zeichnen Sie ein rechtwinkliges Koordinatenkreuz im Querformat. Nutzen Sie die volle Blattlänge und –breite. Die unabhängige Variable sollte auf der x-Achse aufgetragen werden.
- 2. Wählen Sie eine passende Skalierung. Das Ablesen der Datenpunkte soll dem Leser vereinfacht werden.
- 3. Beschriften Sie die Achsen mit den physikalischen Größen und Einheiten. Beschriften Sie die Hauptstriche.
- 4. Zeichnen Sie die Datenpunkte als Punkte bzw. Kreuze x oder beliebige Symbole ein.
- 5. Zeichnen Sie eine Ausgleichsgerade. Sie wird so angelegt, dass möglichst viele Punkte nah an der Geraden bzw. sich oberhalb und unterhalb der Geraden etwa gleich viele Messpunkte befinden ("nach Augenmaß durchziehen").
- 6. Zeichnen Sie ein möglichst großes Steigungsdreieck ein. Lesen Sie die Strecken für $\Delta x = x_2 x_1$ und $\Delta y = y_2 y_1$ ab. Der Achsenabschnitt lässt sich bei x = 0 an der Ordinate ablesen.
- 7. Berechnen Sie die Steigung mit $m = \Delta y / \Delta x$. Den Fehler von m können Sie abschätzen, wenn Sie weitere Ausgleichsgeraden einzeichnen, welche eine minimal bzw. maximal mögliche Steigung hätten. Der Fehler Δm wäre etwa der Mittelwert aus beiden Steigungen: $\Delta m \approx (m_{maximal} - m_{minimal})/2.$
- 8. Beschriften Sie das Diagramm mit einem Titel, einer Legende sowie der ermittelten Geradengleichung in der Form y = mx + b. Gegebenenfalls sind Einheiten der Fitparameter mit anzugeben.



Abbildung 35 Ergebnis der linearen Regression auf dem Millimeterpapier. Das Ergebnis ist vergleichbar mit der in Excel durchgeführten Regression.

Regression von Kurven mit exponentiellem Verlauf

Viele zeitlich abhängige Vorgänge lassen sich mithilfe eines exponentiellen Gesetzes beschreiben. Diese Vorgänge begegnen Ihnen täglich – wenn Sie beispielsweise Ihren Kaffee trinken, findet eine Abkühlung nach einem exponentiellen Gesetz statt oder wenn Sie das Licht ausschalten. Manche Vorgänge sind für uns unsichtbar und verlaufen exponentiell: z. B. Wachstumsvorgänge von Mikroorganismen oder radioaktive Zerfallsprozesse von Atomkernen.

Im Rahmen des Physiklabors werden Sie physikalische Vorgänge kennenlernen, welche einem exponentiellen Verhalten unterliegen. Dazu zählen beispielsweise die Entladung eines Kondensators oder die Dämpfung von Schwingungen. Exponentielle Vorgänge werden typischerweise durch die Modellgleichung

$$y = A_0 \cdot e^{\lambda x}$$

beschrieben. Dabei sind A_0 ein Anfangswert bzw. eine Anfangsamplitude und λ sog. Dämpfungsfaktor. Diese zwei Parameter können mithilfe der exponentiellen Regression bestimmt werden.

Beispiel eines exponentiellen Fits

Gegeben sind die Werte in der Tabelle 7. Diese werden grafisch dargestellt und den Datenpunkten eine Trendlinie hinzugefügt (Rechtsklick auf die Datenpunkte \rightarrow Trendlinie hinzufügen \rightarrow Exponentiell). Aus der Formel lassen sich die Parameter direkt ablesen⁸. Dabei ist $A_0 = 1,405$ und $\lambda = -1,893$.



i	X i	y i	i	X i	y i
1	0	1,385	12	1,1	0,16
2	0,1	1,16	13	1,2	0,15
3	0,2	0,96	14	1,3	0,12
4	0,3	0,72	15	1,4	0,09
5	0,4	0,69	16	1,5	0,07
6	0,5	0,52	17	1,6	0,07
7	0,6	0,44	18	1,7	0,05
8	0,7	0,42	19	1,8	0,05
9	0,8	0,38	20	1,9	0,04
10	0,9	0,25	21	2,0	0,04
11	1	0,23	-	-	-



Abbildung 36 Exponentieller Fit.

Linearisierung einer Exponentialfunktion

Manchmal kann es sehr praktisch sein, einen Exponentialverlauf zu linearisieren – d. h. man überführt die Kurve aus Abbildung 36 in eine Gerade, sodass sich aus dem Achsenabschnitt und der Steigung der Geraden die Parameter A_0 und λ bestimmen lassen. Hierfür wurde unserer Wertetabelle eine neue Spalte $\ln(y_i)$ hinzugefügt. Durch das Logarithmieren wird die ursprüngliche Modellgleichung zu einer Geradengleichung überführt:

$$y = A_0 \cdot e^{\lambda x} \Longrightarrow \ln(y) = \underbrace{\ln(A_0)}_{b} + \underbrace{\lambda}_{m} \cdot x$$

Der Ausdruck $\ln(A_0)$ entspricht dem Achsenabschnitt b und λ der Steigung m in der Geradengleichung $y = m \cdot x + b$.

⁸ Im Versuchsteil "Entladekurve eines Kondensators" hätte A_0 die Einheit Volt und λ die Einheit 1/s, da das Produkt von λx in exp(λx) dimensionslos sein muss.

Tabelle 8 Der Tabelle 7 wurde eine neue Spalte hinzugefügt, in der die y_i -Werte logarithmiert wurden. Der Plot von $ln(y_i)$ gegen x_i ist in Abbildung 37 dargestellt.

i	x _i	y i	In(y _i)	i	x _i	y i	In(y _i)
1	0	1,385	0,326	12	1,1	0,16	-1,808
2	0,1	1,16	0,147	13	1,2	0,15	-1,924
3	0,2	0,96	-0,045	14	1,3	0,12	-2,097
4	0,3	0,72	-0,325	15	1,4	0,09	-2,456
5	0,4	0,69	-0,364	16	1,5	0,07	-2,726
6	0,5	0,52	-0,646	17	1,6	0,07	-2,688
7	0,6	0,44	-0,821	18	1,7	0,05	-2,905
8	0,7	0,42	-0,876	19	1,8	0,05	-3,090
9	0,8	0,38	-0,975	20	1,9	0,04	-3,192
10	0,9	0,25	-1,368	21	2	0,04	-3,311
11	1	0,23	-1,459				



Abbildung 37 Durch Logarithmieren wurde die exponentiell abklingende Kurve aus Abbildung 36 in eine lineare Form transformiert. Damit lassen sich Parameter wie die Steigung der Geraden und der Achsenabschnitt sehr einfach ablesen.

Das Ergebnis ist in Abbildung 37 sichtbar. Die Regressionsparameter, ermittelt mit der Excel-Funktion RGP(), sind gegeben mit:

m	-1,893	b	0,340
∆m	0,035	Δb	0,041
R ²	0,994	∆y	0,096

Mithilfe der Beziehung $A_0 = e^b$ lässt sich der präexponentielle Faktor $A_0 = 1,405$ aus der Steigung *b* berechnen.

Umgang mit Ausreißern

Es kommt durchaus vor, dass man in dem Diagramm einen Messpunkt findet, der "aus der Reihe tanzt". Die erste Reaktion sollte sein, den Wert nochmal zu überprüfen: ist es ein Tippfehler? Falsch abgeschrieben? Um eine Kommastelle vertan? Falsch berechnet? Falls Sie all diese Fragen mit einem "nein" beantwortet haben, dann handelt es sich wahrscheinlich um einen systematischen oder einen groben Fehler.

Letztendlich müssen Sie entscheiden, wie Sie damit umgehen. Falsch wäre es, den Wert zu verheimlichen, ihn zu schwärzen oder zu streichen. Der Wert wird in der Regressionsrechnung nicht berücksichtigt, sollte aber auf dem Diagramm auftauchen. Der Wert wird von Ihnen mit einem Paar Klammern () als Ausreißer angedeutet (siehe Abbildung 38).



Abbildung 38 Beispiel beim Umgang mit Ausreißern. Diese werden in der Regression nicht berücksichtigt, sollten aber dennoch im Diagramm auftauchen. Nicht berücksichtigte Werte werden eingeklammert.

Fehlerrechnung

Die Fehlerrechnung gehört erfahrungsgemäß zu den unbeliebten Aufgaben einer Auswertung. Es ist auch verständlich, da man sich im Alltag und später auch im Beruf sehr selten mit Messunsicherheiten und Toleranzen auseinandersetzen wird.

Prinzipiell ist jede Größe, die Sie messen, auf irgendeine Art und Weise fehlerbehaftet. Wenn Sie mit dem Auto zur Hochschule fahren und Ihr Tachometer zeigt 50 km/h als Geschwindigkeit an – glauben Sie dem Gerät, dass Sie mit genau dieser Geschwindigkeit fahren? Hoffentlich nicht!⁹

Von daher sollten Sie immer kritisch beim Umgang mit Messwerten und Ergebnissen sein. Sie können Ihren Eltern und Ihrer Freundin/Ihrem Freund vertrauen, aber vertrauen Sie keinem Taschenrechner oder einem Messgerät, das Sie nicht selbst gebaut haben! Dies kann unter Umständen zu großer Enttäuschung führen. Soviel zur Philosophie der Fehlerrechnung...

Im Rahmen des Physiklabors werden Sie verschiedene physikalische Größen messen: Zeit, Temperatur, Masse, Strom, Länge bzw. Abstand, Spannung, Lichtintensität etc. Bei Einzelmessungen (n = 1) reicht in der Regel eine Abschätzung von Fehlergrößen gemäß Tabelle 9 aus.

Physikalische Größe	Messgerät	Fehlerabschätzung			
Zeit	Digitale Stoppuhr (1/100 s)	Persönliche Reaktionszeit: $\pm 0,25$ s			
		Genauigkeit der Uhr: $\pm 1,5\cdot 10^{-5}~{ m s}^{-1}$			
	Analoge Uhr (1 s)	±1 s			
Temperatur	Digitalthermometer	±0,1 °C			
	Flüssigkeitsthermometer	\pm 0,5 Skalenteile			
Masse	Digitalwaage (Mettler PL 3000)	±0,1 g			
Strom/Spannung	Digitales Multimeter	Herstellerangaben notwendig, da die			
		Messgenauigkeit vom Messbereich und			
		der Auflösung des Geräts abhängig sind			
Länge	Metermaß	$\pm 0,5$ Skalenteile			
	Laser-Entfernungsmessgerät	±3 mm			
	(Leica DISTO classic)				
	Messschieber	+0.05 mm			

Tabelle 9 Angaben von Messfehlern¹⁰, sofern keine Herstellerangaben vorliegen.

Die Genauigkeit der Stoppuhr ist laut Hersteller mit $\Delta t_{Uhr} = 1,5 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ angegeben. Dies entspricht laut Herstellerangabe einem Messfehler von 30 s pro Monat. Würden Sie diese Genauigkeitsangabe in Ihrer Ausarbeitung mit berücksichtigen oder könnte man diese Angabe vernachlässigen?¹¹

⁹ Durch Messungen mit dem GPS-Sensor ergibt sich in der Realität eine Geschwindigkeit von etwa 46 km/h, auch wenn man laut Tachometer genau mit 50 km/h fährt. Die Geschwindigkeitsdifferenz von (50 – 46 = 4) km/h sorgt dafür, dass Sie nicht vom Blitzer erfasst werden, auch wenn Sie sich an die Verkehrsvorschriften halten oder kurzzeitig mit 55 km/h fahren. Die Toleranz eines Blitzers beträgt in der Regel maximal +3 %, was bei einer Geschwindigkeitsmessung von 50 km/h eine maximale Geschwindigkeitsüberschreitung von 1,5 km/h erlaubt.

¹⁰ Korrekterweise spricht man von Messunsicherheiten. Die Bezeichnung "Fehler" bzw. "Messfehler" ist veraltet, wird aber dennoch häufig verwendet.

¹¹ Diese Angabe kann man bei relativ kurzen Zeitmessungen (t << 1 h) vernachlässigen. Die Stoppuhr besitzt eine relativ hohe Genauigkeit. Sie läuft so genau, dass Sie etwa 4,5 Stunden lang die Zeit messen müssten, um in den Bereich der persönlichen Reaktionszeit von 0,25 s zu kommen.

Sie wollen im Rahmen eines (fiktiven) Experiments den Schubmodul G gemäß Gleichung

$$G = \frac{2 \cdot l}{\pi \cdot r^4} \cdot M \tag{1}$$

bestimmen. Dabei wird ein dünner, einseitig eingespannter Draht mit dem Radius r und der Länge l mit einem Drehmoment M verdrillt. Die gemessenen Größen sind l, r und M. Welchen Einfluss haben die Fehlergrößen $\Delta l, \Delta r$ und ΔM auf das Ergebnis ΔG ? Es wurden folgende Werte gemessen: $l = (0,565 \pm 0,003)$ m, $M = (6,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$ N · m und $r = (2,49 \pm 0,13)$ mm

Ergebnis von G (ungerundet)

$$\overline{G} = \frac{2 \cdot 0,565 \text{ m}}{\pi \cdot (2,49 \cdot 10^{-3} \text{ m})^4} \cdot 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} = 62691113 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Fehler von G

Die Potenzschreibweise der Gleichung (1) wäre

$$G = \frac{2}{\pi} \cdot r^{-4} \cdot l^1 \cdot M^1$$

Für den Fehler ΔG gilt dann

$$\Delta G = \overline{G} \cdot \sqrt{\left(-4\frac{\Delta r}{\overline{r}}\right)^2 + \left(1\frac{\Delta l}{\overline{l}}\right)^2 + \left(1\frac{\Delta M}{\overline{M}}\right)^2} = \overline{G} \cdot \sqrt{\left(-4\frac{0,13}{2,49}\right)^2 + \left(1\frac{0,003}{0,565}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{6,7}\right)^2}$$

Setzen wir die Werte in die entsprechenden Terme ein, so erhalten wir in der folgenden Zwischenrechnung (Terme in den Klammern wurden bereits quadriert):

$$\Delta G = \overline{G} \cdot \sqrt{\underbrace{(4,361 \cdot 10^{-2})}_{\text{Beitrag des Radius}} + \underbrace{(2,819 \cdot 10^{-5})}_{\text{Beitrag der Drahtlänge}} + \underbrace{(5,570 \cdot 10^{-3})}_{\text{Beitrag des Drehmoments}}$$

Man sieht hierbei, dass der Beitrag des Radius den größten Fehlerbeitrag liefert, gefolgt von dem Fehlerbeitrag des Drehmoments. Damit die Messgenauigkeit verbessert wird, sollte insbesondere der Radius wesentlich genauer bestimmt werden (z. B. mithilfe einer Bügelmessschraube statt eines Messschiebers). Der Beitrag der Drahtlänge liefert einen sehr kleinen Beitrag zum Fehler von *G* im Vergleich zum Radius und dem Drehmoment.

Ergebnis zu ΔG

$$\Delta G = 62691113 \frac{N}{m^2} \cdot 0,22183 = 13906768 \frac{N}{m^2}$$

Messergebnis (gerundet)

$$G = (6,3 \pm 1,4) \cdot 10^7 \frac{N}{m^2}$$

Abbildung 39 Beispielrechnung zum Einfluss einer Fehlergröße auf das Messergebnis.

Hier ist stets Ihr gesunder Menschenverstand gefragt und Sie müssen ein wenig experimentelle Erfahrung haben. Überlegen Sie sich immer vorher, wie ein Messfehler Ihr Ergebnis beeinflussen könnte. Ist der Einfluss sehr klein, kann dies u. U. vernachlässigt werden. Es erspart Ihnen einen erhöhten Rechenaufwand.

Vorgehensweise bei der Fehlerfortpflanzung

Die Theorie zur statistischen Auswertung von Messungen und Fehlerfortpflanzung finden Sie in der Fachliteratur (z. B. in *Papula, Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3, 5. Auflage, Vieweg+Teubner 2008*). Prinzipiell läuft es wie folgend ab:

- Sie führen Ihren Versuch durch und nehmen dabei Messwerte in Form von Einzel- und Mehrfachmessungen auf (z. B. Längen, Temperaturen, Zeiten usw.). Generell empfiehlt es sich, jede fehlerbehaftete Größe mehrfach zu messen, um einerseits grobe Fehler zu vermeiden (z. B. wenn Sie sich aus Nichtachtsamkeit verschreiben) und um andererseits eine gewisse statistische Aussage über die Messung zu bekommen.
- Bei Einzelmessungen schätzen Sie den Messfehler ab. Sie können sich dabei an die Empfehlungen gemäß Tabelle 9 richten. Bei Einzelmessungen kann das Vertrauensintervall von $\approx 95\%$ mit einem Faktor von k = 2 angegeben werden¹². **Beispiel:** Sie messen die Fadenlänge l beim Pendelversuch einmalig mit l = 98,3 cm. Da die Skala des Metermaßes in cm und mm unterteilt ist, wäre die kleinste schätzbare Länge 0,5 Skt groß, also 0,5 mm. Da Sie das Metermaß an zwei Stellen anbringen (am Anfang und am Ende des Fadens), müssen Sie den Fehler doppelt berücksichtigen. Daraus ergibt sich für $\Delta l = 2 \cdot \frac{1}{2}$ Skalenwert = $2 \cdot 0,5$ mm $\Rightarrow \Delta l = 1$ mm

Für die statistische Sicherheit von etwa 95% können Sie Δl mit dem Faktor k = 2 erweitern. Daraus ergibt sich für $\Delta l = \pm 2$ mm.

- Bei Mehrfachmessungen berechnen Sie die arithmetischen Mittelwerte und ggf. Standardabweichungen von Ihren Messreihen. **Beispiel:** Sie bestimmen die Dauer von 50 Perioden, also $50 \cdot T$, eines Fadenpendels. Dabei messen Sie $50 \cdot T$ mehrfach (z. B. 8 mal). Berechnen Sie den Mittelwert und die Standardabweichung von einer Periode und geben Sie das Ergebnis in der Form $T = (\overline{T} \pm t_{95\%} \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{n}})$ an. Der Faktor $t_{95\%}$ (Student *t*-Faktor) ist tabelliert (siehe Anhang) und *n* ist die Anzahl der Messwerte (hier: n = 8).
- Berechnen Sie nun Ihren Bestwert mithilfe der gegebenen Formel an. **Beispiel:** Sie möchten die Erdbeschleunigung mit der Formel $g = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot l$ berechnen und haben die Größen T (Periodendauer in s) und l (Länge des Fadens bis zur Kugelmitte in m) gemessen. Der Bestwert \overline{g} wäre gegeben mit $\overline{g} = \left(\frac{2\pi}{\overline{T}}\right)^2 \cdot \overline{l}$. Konkret heißt das: Sie setzen in die Gleichung für g die zuvor berechneten Mittelwerte \overline{T} und \overline{l} ein.
- Berechnen Sie die Messunsicherheit des Bestwerts nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz.
 Beispiel: Da es sich bei der Formel von g um ein Potenzgesetz handelt¹³, wenden Sie die folgende
 Formel

$$\Delta g = \overline{g} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{\overline{l}}\right)^2 + \left(-2\frac{\Delta T}{\overline{T}}\right)^2}$$

In der Fachliteratur werden Sie weitere Beispiele zu Themen wie Potenzgesetze und Fehlerfortpflanzung finden.

• Geben Sie nun das vollständige Messergebnis an. Beachten Sie die Rundungsregeln. Angabe mit absolutem Fehler: $g = (\overline{g} \pm \Delta g)$ z. B. $g = (9,84 \pm 0,07)\frac{m}{s^2}$ Angabe mit relativem Fehler: $g = \overline{g} \cdot \left(1 \pm \frac{\Delta g}{\overline{g}}\right)$ z. B. $g = 9,84\frac{m}{s^2} \cdot (1 \pm 7 \cdot 10^{-3})$

¹² Siehe "Leitfaden Messunsicherheit" der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), S. 20 bzw. DIN 1319-4

¹³ Man kann die Gleichung von g auch in der Potenzschreibweise ausdrücken: $g = 4\pi^2 \cdot T^{-2} \cdot l^1$

Hinweis: Manchmal findet man in der Literatur die Kurzschreibweise wie beispielsweise $6,022140857(74) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ oder $100,035(23) \Omega$. Die Zahl in der Klammer deutet die Messunsicherheit mit dem Stellenwert der letzten angezeigten Ziffer des Messergebnisses an. Es ist eine andere Schreibweise für $(6,022140857 \pm 0,000000074) \text{ mol}^{-1}$ bzw. $(100,035 \pm 0,023) \Omega$.

Angabe von Fehlern, Rundungsregeln

Was ist der Unterschied zwischen den folgenden zwei Zahlen: 14,2 und 14,200000000? Mathematisch gesehen gibt es zwischen diesen beiden Zahlen keinen Unterschied. Ihr Taschenrechner wird keinen Unterschied feststellen, ob Sie eine 14,2 oder 14,200000000 eintippen. In der Physik ist das anders. Da macht es einen sehr großen Unterschied, ob Sie 14,2 oder 14,200000000 als Ergebnis angeben!

Stellen Sie sich vor, Sie messen die Kantenlänge eines Würfels einerseits mit einem Messschieber und andererseits mit einem Präzisionsinstrument wie dem Michelson-Interferometer¹⁴. Mit dem Metermaß können Sie 14,20 mm ablesen. Das Michelson-Interferometer liefert Ihnen ein Ergebnis von 14,20000563 mm. Welches Ergebnis ist nun richtig?

Beide Ergebnisse sind "richtig", allerdings fehlen uns die Angaben zur Messunsicherheit bzw. zum Messfehler. Die Genauigkeit der Messmethode entscheidet letztendlich darüber, wie "genau" bzw. mit wie vielen Nachkommastellen die Länge angegeben wird. Dazu muss das Ergebnis auf eine sinnvolle Anzahl von signifikanten Stellen gerundet werden.

Rundungsregeln werden im Rahmen des Physiklabors in zwei Bereichen eingesetzt: beim Rechnen mit physikalischen Größen und bei Angaben von Messergebnissen. Die Rundungsregeln sind in der Norm DIN 1333 (Zahlenangaben) aufgeführt. Auf die DIN-Norm können Sie über das Intranet Ihrer Hochschule zugreifen.

Signifikante Stellen

Unter signifikanten Stellen wird die kleinste Anzahl benötigter Zahlen verstanden, die ein Ergebnis richtig beschreiben¹⁵. Das sind alle Ziffern, welche "von links kommend" eine von Null unterschiedliche Ziffer haben. Alle führenden Nullen vor der Ziffer ungleich Null werden ignoriert. In der Tabelle 10 sind einige Beispiele für Zahlen mit einer unterschiedlichen Anzahl von signifikanten Stellen gelistet. Die erste von der Null verschiedene Zahl ist unterstrichen.

WICHTIG

Im physikalischen Anfängerpraktikum wird eine Messunsicherheit stets mit einer signifikanten Stelle angegeben. Ist die erste signifikante Stelle die Ziffer 1 oder 2, dann wird auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Tabelle 10 Beispiele für verschiedene Zahlen mit unterschiedlicher Anzahl an Nachkommastellen und signifikanter Stellen. Die erste Ziffer ungleich Null (von links nach rechts kommend) ist unterstrichen. Ab dort werden die signifikanten Stellen gezählt.

0,00000 <u>4</u> 8000	10 Nachkommastellen, 5 signifikante Stellen
<u>1</u> 0,555155	6 Nachkommastellen, 8 signifikante Stellen
<u>2</u> ,001	3 Nachkommastellen, 4 signifikante Stellen
0,000 <u>9</u>	4 Nachkommastellen, 1 signifikante Stelle
0,00 <mark>6</mark> 7	4 Nachkommastellen, 2 signifikante Stellen
0, <u>7</u> 040	4 Nachkommastellen, 4 signifikante Stellen

¹⁴ Mit einem Michelson-Interferometer lassen sich Längenunterschiede im Bereich der Wellenlänge des verwendeten Lichts messen. Typische Messbereiche reichen von ~1 nm bis ~1 mm.

¹⁵ Quelle: <u>https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/iaac/fehler-print.pdf</u>

Rundungsregeln bei Messfehlern

Kommen wir auf das Beispiel mit dem Fadenpendel zurück. Sie haben den Versuch durchgeführt und haben eine Pendellänge von $l = (2,8090 \pm 0,03)$ m sowie eine Periodendauer von $T = (3,3655 \pm 0,005)$ s bestimmt (Vertrauensbereich 95%). Daraus ergibt sich für die Erdbeschleunigung ein Bestwert von $\overline{g} = 9,790667 \frac{m}{s^2}$ und eine Messunsicherheit von $\Delta g = 0,108535 \frac{m}{s^2}$. Das Messergebnis geben Sie nun mit

$$g = (9,790667 \pm 0,108535) \frac{m}{s^2}$$

an. Das Ergebnis ist rechnerisch zwar korrekt, aber messtechnisch gesehen völliger Unsinn! Haben Sie wirklich so präzise gemessen, dass Sie die Messunsicherheit der Erdbeschleunigung mit 6 signifikanten Stellen angeben können?

Im Physiklabor werden Messergebnisse mit einer Unsicherheit von einer signifikanten Stelle angegeben. Im Falle von Δg ist die erste Ziffer ungleich Null an der ersten Nachkommastelle. Da es sich um eine 1 handelt, wird die nächste benachbarte Ziffer aufgerundet. Das Ergebnis wäre somit $\Delta g = 0.11 \frac{m}{c^2}$.

Nun müssen wir den Bestwert sinnvoll runden. Dafür schauen wir auf die Messunsicherheit von \overline{g} , die auf 2 signifikante Stellen gerundet wurde. Die letzte Ziffer ist die 2. Nachkommastelle, sodass wir \overline{g} auf die 2. Nachkommastelle runden. Damit ist das gerundete Messergebnis

$$g = (9,79 \pm 0,11) \frac{m}{s^2}$$

WICHTIG

- Anhand der Messunsicherheit wird bestimmt, auf welche Dezimalstelle der Bestwert gerundet wird.
- Bestwerte \overline{x} werden stets nach DIN 1333 gerundet:
 - Ist die Ziffer an der ersten wegfallenden Dezimalstelle eine 0, 1, 2, 3 oder 4, dann wird abgerundet.
 - Ist die Ziffer an der ersten wegfallenden Dezimalstelle eine 5, 6, 7, 8 oder 9, dann wird aufgerundet.
- Messfehler werden stets zur sicheren Seite aufgerundet.

Tabelle 11 Beispiele zur Rundung.

Ergebnis (ungerundet)	Ergebnis (gerundet)	Kommentar
$(1,7356 \pm 0,0604) m$	$(1,74 \pm 0,06) m$	1,7356 auf 1,74 aufgerundet
$(346 \pm 1.84) \frac{m}{m}$	$(3460 \pm 0.019) \cdot 10^2 \frac{m}{2}$	Messunsicherheit hat 2 signifikante Stellen,
(310 <u>+</u> 1,01) S	(3,100 <u>+</u> 0,017) 10 S	die aufgerundet wurden
(227,1 ± 37,9) V	$(2,3 \pm 0,4) \cdot 10^2 V$	37,9 auf 40 aufgerundet, da erste
		signifikante Stelle eine 3 ist. Hinzufügen
		von Nullen auf beiden Seiten
$(292758367 \pm 8756280) \frac{m}{s}$	$(2,93 \pm 0,09) \cdot 10^8 \frac{m}{s}$	Exponentialschreibweise bei großen Zahlen
(1758,68 ± 29,4) g	(1,760 ± 0,029) kg	Hier ist die erste signifikante Stelle eine 2,
	bzw.	gefolgt von einer 9. Die letzte Ziffer wird
	$(1,760 \pm 0,030) kg$	aufgerundet, sodass die Messunsicherheit
		von 0,030 mit zwei signifikanten Stellen
		angegeben wird

Rundungsregeln bei Berechnungen

Streng genommen müssten Sie bei Ihren Berechnungen die Anzahl der signifikanten Stellen berücksichtigt werden. Dies würde allerdings den Rahmen dieses Kurses sprengen. Von daher gibt es nur einige wenige Tipps:

- Zwischenergebnisse können Sie mit 3 (maximal 4) signifikanten Stellen angeben
- Kürzen Sie so spät wie möglich, d. h. erst, wenn Ihnen das Ergebnis vorliegt
- Kürzen Sie nach dem kaufmännischen Prinzip (letzte Dezimalstelle < 5: abrunden, ansonsten aufrunden)

Tabelle 12 Durchführung einer Berechnung mit Darstellung der Zahlen in verschiedenen Zahlenformaten.

	FALSCH	FALSCH	FALSCH	RICHTIG	RICHTIG	(RICHTIG)
	0,64913897	0,64913897	0,649	0,649	0,65	0,6
	0,02514250	0,02514250	0,025	0,025	0,03	0,03
	0,76296929	0,76296929	0,763	0,763	0,76	0,8
	0,97685204	0,97685204	0,977	0,977	0,98	1,0
	0,63340000	0,63340000	0,633	0,633	0,63	0,6
	0,59152845	0,59152845	0,592	0,592	0,59	0,6
	0,63235664	0,63235664	0,632	0,632	0,63	0,6
Summe	4,27138788	4,271	4,27138788	4,271	4,27	4,3

Auch wenn Ihnen die Tabellenkalkulationssoftware die Arbeit erleichtert – denken und handeln müssen Sie selbst. In der Tabelle 12 sind einige Zahlen tabelliert, wobei die letzte Zeile das Ergebnis als Summe aller darüber liegenden Werte enthält. Die fehlerhaften Zellen sind rot, die fehlerfreien grün markiert. Warum wohl? Die Ergebnisse der letzten Spalte können richtig sein, falls eine Rechnung mit etwas höherer Genauigkeit nicht erforderlich ist. Es kommt auf die Aufgabenstellung drauf an.

Vergleichbarkeit mit Literaturwerten

Wenn Sie an dieser Stelle in der Anleitung angekommen sind, dann haben Sie vermutlich Ihre Messung ordnungsgemäß durchgeführt und ausgewertet. Vor Ihnen liegt nun ein Messergebnis. Sie fragen sich bestimmt: "Wofür braucht man das?" oder "Welche Erkenntnis bringt mir dieses Experiment?"

Das Ziel des Experiments war es, einen physikalischen Effekt oder Gesetzmäßigkeit unter kontrollierbaren Bedingungen (sog. Laborbedingungen) zu untersuchen. Das Ergebnis dieses Experiments liefert Ihnen eine objektive Aussage über diesen physikalischen Effekt oder Gesetzmäßigkeit.

Sie werden im Rahmen des Physiklabors keine neuen Theorien erstellen oder aktuell gültige Theorien experimentell überprüfen. Das ist die Aufgabe der Physiker. Was Sie tun ist folgendes: Sie wiederholen ein Experiment und vergleichen Ihre Ergebnisse mit den bereits existierenden. Durch einen Vergleich mit anderen Versuchsergebnissen können Sie die Qualität Ihres Experiments besser beurteilen.

Nehmen wir das Fadenpendel-Beispiel aus dem Abschnitt "Rundungsregeln bei Messfehlern". Sie haben nun die Erdbeschleunigung in Friedberg (Hessen) mit $g = (9,79 \pm 0,11) \frac{m}{s^2}$ bestimmt. Nun wollen Sie wissen, ob das Ergebnis gut oder schlecht ist.

Suche nach einem Literaturwert

Es gibt verschiedene Quellen für Literaturwerte. Tabellenwerke, Lehrbücher, Veröffentlichungen, Datenbanken oder das Internet, um einige zu nennen. Wo Sie suchen, das entscheiden Sie.

WICHTIG

Geben Sie den Ort, wo Sie den Literaturwert her haben, immer an! Diese Angabe muss folgende Informationen enthalten:

- Lehrbuch als Quelle Autor, Titel des Buchs, Auflage, Verlag, Ort, Jahr
- Internet als Quelle
 Autor/Institution, Titel der Homepage, URL, Abrufdatum
 Sehr wichtig: speichern Sie die aufgerufene Seite als PDF-Datei ab oder drucken Sie sie aus!
 Es kann sein, dass sie von heute auf morgen verschwindet (z. B. Seite wurde gelöscht, nicht erreichbar, …) und Ihre Quellenangabe ist somit wertlos.
- Veröffentlichung Autor, Titel, Zeitschrift, Ort, Jahr
- Die Angabe in der Form "g = 9,81665 m/s² Quelle: Wikipedia" reicht nicht aus und wird nicht akzeptiert
- Die Quellenangabe können Sie in Form einer Fußnote (wie hier) oder in einem separaten Literaturverzeichnis am Ende der Ausarbeitung aufführen

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) stellt den Besuchern auf ihrer Internet-Seite¹⁶ eine Gravitations-Landkarte zur Verfügung. Darin kann man nach Orten suchen und die lokale Erdbeschleunigung herausfinden. Für Friedberg (8,759° Länge, 50,341° Breite, 137,1 m über NN) ergibt sich eine Erdbeschleunigung (Vertrauensintervall 95%) von

¹⁶ Siehe PTB Gravity Information System, <u>http://www.ptb.de/cartoweb3/SISproject.php</u>, abgerufen am 10.10.2015

$$g_{\text{Friedberg}} = (9,810661 \pm 0,000041) \frac{m}{s^2}$$

Nun haben auch andere "Persönlichkeiten" unser Fadenpendel-Experiment durchgeführt und folgende Ergebnisse erhalten:

Experimentator	g in m/s²	∆g in m/s²
PTB (Literaturwert)	9,810611	0,000041
Student	9,79	0,11
Spider-Man	9,65	0,30
Grumpy Cat	10,05	0,20
Prof. X	9,93	0,03

Wenn wir diese Ergebnisse gemäß Abbildung 40 grafisch darstellen, können wir etwas über die Qualität unserer und anderer Messungen aussagen. Die Messpunkte stellen die Position des Bestwerts auf der vertikalen Achse dar. Die vertikale Linie, die durch den Messpunkt hindurch geht (sog. Fehlerbalken), stellt die Breite des Vertrauensintervalls von 95% (bzw. je nach Angabe auch 68%) dar.



Abbildung 40 Vergleich der verschiedenen Messergebnisse mit dem Literaturwert.

Im Falle des Studenten und "Spider-Man" überlappen die Fehlerbalken mit dem Literaturwert (PTB). Diese beiden Messungen stimmen mit dem Literaturwert im Rahmen der Fehlergrenzen überein. "Spider-Man" hat recht unpräzise gemessen, aber dennoch ist sein Ergebnis "richtig".

Die Messungen von "Grumpy Cat" sowie "Prof. X" überlappen nicht mit dem Literaturwert. Da ist während des Experiments etwas schief gelaufen. Vielleicht hatte "Grumpy Cat" nur einen schlechten Tag, aber diese Messung ist kläglich fehlgeschlagen. Vielleicht kann ihn eine Erweiterung des Vertrauensintervalls auf 99,9% retten.

Insbesondere sieht man bei der Messung von "Prof. X" einen kleinen Fehlerbalken (präzise Messung, 10x genauer als die Messung von "Spider-Man"), aber keine Überlappung mit dem Literaturwert. Hier liegt vermutlich ein (unbekannter) systematischer Fehler vor, der nicht von dem Experimentator entdeckt wurde.

Normalerweise wird die relative Abweichung vom Literaturwert in % angegeben, also in der Form

$$\frac{g - g_{\text{Friedberg}}}{g_{\text{Friedberg}}} \cdot 100 \% = -0.21 \%$$

Man könnte nun behaupten, dass diese Messung "gut" sei, da der Bestwert sehr nahe am Literaturwert liegt. Das wichtigste Kriterium ist dennoch, dass das Messergebnis mit dem Literaturwert innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmt.

Korrekturen

Die Abgabefrist der Ausarbeitung beträgt in der Regel 2 Wochen nach der Durchführung des Experiments. Der verantwortliche Dozent wird Ihre Ausarbeitung durchsehen und auf Fehler untersuchen. Sollten Fehler entdeckt worden sein, sind Sie und Ihr Laborpartner für die Korrektur dieser Fehler zuständig. Keine Panik, sie müssen nicht Ihre Ausarbeitung komplett neu überarbeiten. Es müssen lediglich die Mängel nachgebessert werden. Sehr selten kann es passieren, dass eine Messung wiederholt werden muss, falls der Versuch nicht ausgewertet werden kann, wenn z. B. essenzielle Messwerte fehlen (z. B. wenn Sie vergessen, beim Pendelversuch die Länge des Fadens zu messen).

WICHTIG

- Die Korrektur des fehlerhaften Blattes erfolgt auf einem separaten DIN A4 Blatt. Korrekturen mit Bleistift oder Kugelschreiber auf dem fehlerhaften Blatt werden nicht akzeptiert.
- Kennzeichnen Sie die Seitenzahl mit xKy (x = Seite Nr., Ky = Korrektur Nr. y). Beispiel: Seite Nr. 4 soll das 1. Mal korrigiert werden. Kennzeichnen Sie das Blatt mit der Korrektur mit 4K1. Bei einer eventuellen Korrektur von 4K1 beschriften Sie die korrigierte Version mit 4K2 etc.
- Heften Sie das korrigierte Blatt hinter das fehlerhafte Blatt ab. Beispiel zur Reihenfolge der Blätter: 1, 2, 2K1, 3, 4, 4K1, 5, 6
- Bei der erneuten Abgabe müssen alle Blätter (alte und neue) zusammen abgegeben werden. Achten Sie auf die Vollständigkeit der Unterlagen. Es darf kein Blatt fehlen!

Anhang

Im folgenden Anhang finden Sie die Checklisten für das Messprotokoll und die Ausarbeitung. Zusätzlich dazu gibt es eine Anleitung zur nichtlinearen Regression mit Excel.

Checkliste "Messprotokoll"

Angaben zur Vollständigkeit

- Name(n)
- Datum
- Versuchstitel und Versuchsnummer und eventuelle Zwischenüberschriften
- Seitenanzahl

Angaben zur Eindeutigkeit

- Messwertetabellen
 - Korrekte Beschriftung mit physikalischer Messgröße, Formelzeichen und Einheit im Tabellenkopf
 - Laufende Durchnummerierung bei einer Messreihe
 - Trennstriche der Spalten (und evtl. Zeilen)
 - Zuordnung der Tabelle zum jeweiligen Teilversuch bzw. zur Probe muss eindeutig sein
- Beispieltabelle

Nr.	Spannung	Strom	Leistung
	U/mV	I/A	P/W
1	0	0,001	0
2	50	0,050	0,003
3	100	0,110	0,011
4	150	0,160	0,024
5	300 200	0,220	0,044
6	250	0,250	0,063
7	300	0,110	0,033

Die Daten sollen gut leserlich, übersichtlich und eindeutig dargestellt werden.

Angaben zu Fehlern und Messunsicherheiten (sofern erforderlich)

- Fehlerangaben der verwendeten Messgeräte (falls vorhanden)
- Sinnvolle Fehlerabschätzung (persönliche Reaktionszeit: z. B. ±0,25 s, Ablesefehler an einer Skala: ±0,5 Skt)

Nicht erlaubt ist

- Schwärzen von Messwerten (auch nicht mit Korrekturflüssigkeit)
- Schreiben mit Bleistift oder Buntstiften/Filzstiften in Farben rot oder grün
- Schmierzettel, Einkleben oder Überkleben von Diagrammen etc.

Bei Versuchsende

- Messprotokoll kontrollieren bzw. unterschreiben lassen
- Arbeitsplatz aufräumen

Checkliste zur Ausarbeitung

Die Stichpunkte in dieser Checkliste sollten Sie während bzw. nach der Ausarbeitung durchgehen.

Anforderungen an die äußere Form

- DIN A4 Blätter, weiß, einseitig beschrieben mit Angabe von Seitenzahlen
- Abgabe in einem Schnellhefter (keine Heftstreifen, keine Prospekthüllen, keine Bewerbungsmappen, keine Büroklammern, tackern nicht erlaubt)
- Inhalt des Schnellhefters bei Abgabe
 - Deckblatt (ausgefüllt mit Namen, Matrikelnummer, Gruppe, Abgabedatum, Namen des Dozenten)
 - Schriftliche Beantwortung der Fragen zum Versuch
 - Messprotokoll (handschriftlich)
 - Ausarbeitung (handschriftlich oder auf dem PC verfasst und ausgedruckt)

Anforderungen an die Ausarbeitung

Grundsatz: Verfassen Sie Ihre Ausarbeitung so, wie es auch für einen (internen) Bericht in einem Unternehmen angebracht wäre. Ein anderer Ingenieur bzw. Ihr Vorgesetzter soll Ihren Bericht so lesen und verstehen können, ohne Rücksprache mit Ihnen halten zu müssen.

Allgemeines

• Ist das Layout einheitlich gestaltet? Schriftbild OK? Farben beim Ausdruck nicht zu blass? Ist eine sinnvolle Gliederung vorhanden? Rechtschreibung und Grammatik überprüft?

Aufgabenstellung (Fragenteil)

• Fragenstellung mit abgeschrieben? Eine Antwort auf die Frage formuliert? Ergebnisse hervorgehoben (z. B. unterstreichen)? Einheiten berücksichtigt? Eventuelle Literatur- bzw. Quellenangaben vorhanden?

Physikalische Größen und Einheiten

- <u>Alle</u> Maßzahlen mit physikalischen Einheiten versehen? Bsp.: 230 V, 4120 J/(mol K), 25,9 °C
- Maßzahl und physikalische Einheit stets mit einem Leerzeichen getrennt? Bsp.: 9,81 m/s², nicht erlaubt: 9,81m/s²

Tabellen

- Tabellenkopf: Nummerierung vorhanden? Physikalische Größen mit Einheiten versehen? Alle Formelzeichen korrekt? Bedeutung der Formelzeichen mind. einmal im Text aufgeführt?
- Tabellenkörper: Zahlen gerundet? Zahlenformatierung einheitlich (1,234 statt 1,234E+00)? Tabellenrahmen vorhanden? Zellengröße an den Inhalt angepasst?
- Tabellenüberschrift (optional)

Abbildungen und Grafiken

- Skizzen und schematische Darstellungen Skizze ordentlich gezeichnet und bemaßt/beschriftet? Ist die Qualität des Bildes hoch genug (keine Artefakte)? Ausdruck auf dem Papier gut erkennbar, d. h. nicht blass? Skalierung ausreichend hoch? Bildunterschrift vorhanden? Bei Verwendung von Fremdmaterial: Quellenangabe vorhanden?
- x-y-Diagramme

- Größe des Diagramms angemessen (Hochformat: ca. 16 cm x11 cm, Querformat: volle Breite und Höhe)? Überschrift im Diagramm vorhanden? Darstellung als Punktdiagramm gesetzt? Ist eine Bildunterschrift vorhanden (Abb. 1: Text...)? Ausdruck mit hohem Kontrast? Auf Rechtschreib- und inhaltliche Fehler geprüft?
- Datenpunkte: Alle Punkte sichtbar/gut erkennbar? Voneinander unterscheidbar (unterschiedliche Symbole)? Datenpunkte <u>nicht</u> mit Linien/Splines verbunden?
- Achsen: Beschriftung der x- und y-Achse mit Größe und Einheit? Skalierung so gewählt, dass die Messpunkte die volle Höhe/Breite einnehmen? Gitternetz vorhanden? Haupt- und Teilstriche vorhanden? Achsenskalierung korrekt (linear/einfach- bzw. doppel-logarithmisch)?
- Legende: Bei einem Datensatz: Legende weggelassen? Bei mehreren Datensätzen auf einem Diagramm: Legende vorhanden? Alle Symbole und Fitgeraden aufgeführt? Datensätze ordentlich und eindeutig beschriftet? Position der Legende auf dem Diagramm in Ordnung?
- Bei Regression (Fit): Fitparameter (Formel und Bestimmtheitsmaß) im Diagramm enthalten? Position der Textbox mit Fitparametern in Ordnung, d. h. keine Überlappung mit Messpunkten/Fitkurven? Zahlenwerte sinnvoll gerundet? Falls gefordert: Trendlinie/Trendkurve vorhanden?
- Bilder/Screenshots
 - Beschriftung aller wesentlichen Elemente vorhanden? Bild zugeschnitten? Bildgröße in Ordnung? Bildunterschrift vorhanden (Abb. 1: Text...)? Ausdruck der Seite mit dem Bild brauchbar? Bei Fremdbildern: Quellenangabe vorhanden?

Formeln und Gleichungen

• Ist die Bedeutung der Formelzeichen mindestens einmal im Text aufgeführt? Formelzeichen korrekt dargestellt (Bsp.: *c*_w statt cw oder c_w)? Sind besondere Gleichungen/Formeln durchnummeriert?

Auswertung

Allgemeines

- Sind alle Teilaufgaben (a bis h) des Abschnitts "Auswertung" aus der Versuchsanleitung bearbeitet worden?
- Sind alle Zwischen- und Endergebnisse hervorgehoben (z. B. fett oder unterstrichen)? Ist der Rechenweg nachvollziehbar? Stimmen alle Einheiten? Sind die Ergebnisse sinnvoll gerundet worden (max. 3 signifikante Stellen)?

Regressionsanalyse

- Stimmt der physikalische Zusammenhang (linear, exponentiell) mit der Messung überein?
- Gibt es starke Ausreißer (> 20%)? Wenn ja: sind die mit Klammern () im Diagramm gekennzeichnet? Ausreißer werden in der Regressionsanalyse nicht berücksichtigt.
- Ist die Trendlinie im x-y-Diagramm eingezeichnet?
- Sind die Fitparameter im x-y-Diagramm angegeben (Formel und Bestimmtheitsmaß)? Sind die Werte sinnvoll gerundet?
- Ist eine Legende im Diagramm vorhanden?
- Falls gefordert: ist das Steigungsdreieck im Diagramm eingezeichnet und ausgewertet worden?

Fehlerrechnung (sofern notwendig für die Auswertung)

- Sind alle gemessenen Größen (Massen, Temperaturen, Längen etc.) mit einer Messunsicherheit angegeben (z. B. m = 376,5 g und $\Delta m = \pm 0,1$ g)?
- Bei Einzelmessungen: Wurden die Messunsicherheiten von Einzelmessungen (also einmal gemessenen Messwerten) sinnvoll abgeschätzt (z. B. $\Delta l = \pm \frac{1}{2}$ Skt)?
- Bei Mehrfachmessungen: Wurde der arithmetische Mittelwert berechnet? Wurde die Standardabweichung berechnet? Wurde ein Vertrauensintervall von 95% berücksichtigt? Wurde das Zwischenergebnis in der Form $x = \left(\overline{x} \pm t_{95\%} \cdot \frac{\Delta x}{\sqrt{n}}\right)$ angegeben?
- Wurde die zu berechnende Größe (z. B. Erdbeschleunigung) mithilfe der Fehlerfortpflanzung berechnet? Gab es bei der Berechnung Fehlergrößen, die vernachlässigbar klein waren?

Angabe von Messergebnissen, Rundung

- Liegt das Messergebnis in der Form $x = (\overline{x} \pm \Delta x)$ vor? Ist ein Vertrauensintervall von 95% gegeben?
- Wurden die Werte \overline{x} und Δx gemäß Rundungsregeln gerundet?
- Wurde der experimentell bestimmte Wert mit einem Literaturwert verglichen?
- Falls erforderlich: Wurde die Quelle des Literaturwerts angegeben (Lehrbuch, Tabellenwerk, Internet usw.)? Sind die Angaben vollständig (Autor(en), Titel, Auflage, Verlag, Ort, Jahr)?
- Bei Internetquellen: Kopie der aufgerufenen Seite als PDF gespeichert bzw. ausgedruckt?

Korrekturen

- Sind die korrigierten Blätter gekennzeichnet? *Beispiel:* 4K1 = 4. Seite, Korrektur Nr. 1 oder S. 5K = Korrektur der 5. Seite usw.
- Ihre Korrekturen werden hinter die zu korrigierenden Blätter eingeordnet
- Korrekturen mit Bleistift werden nicht akzeptiert
- Achten Sie auf die Vollständigkeit der abgegebenen Unterlagen

Tabelle mit Student t-Faktoren

Tabelle 13 Werte für t und t_{∞} für verschiedene Vertrauensniveaus $(1 - \alpha)$ bei normalverteilten Messwerten. Quelle: DIN 1319-3. Im Physiklabor werden t-Faktoren für den zweiseitigen Vertrauensbereich benötigt. Bsp.: $n = 6 \Rightarrow t_{95\%} = 2,57$

	t für zweiseitigen Vertrauensbereich: $1 - \alpha =$									
Anzahl	68,26 %	90 %	95 %	99 %	99,5 %	99,73 %				
n der		t für eins	t für einseitigen Vertrauensbereich: $1 - \alpha = 1$							
Meßwerte		95 %	97,5 %	99,5 %	99,75 %					
2	1,84	6,31	12,71	63,66	127,32	235,8				
3	1,32	2,92	4,30	9,92	14,09	19,21				
4	1,20	2,35	3,18	5,82	7,45	9,22				
5	1,14	2,13	2,78	4,60	5,60	6,62				
6	1,11	2,02	2,57	4,03	4,77	5,51				
7	1,09	1,94	2,45	3,71	4,32	4,90				
8	1,08	1,89	2,36	3,50	4,03	4,53				
9	1,07	1,86	2,31	3,36	3,83	4,28				
10	1,06	1,83	2,26	3,25	3,69	4,09				
11	1,05	1,81	2,23	3,17	3,58	3,96				
12	1,05	1,80	2,20	3,11	3,50	3,85				
13	1,04	1,78	2,18	3,05	3,43	3,76				
20	1,03	1,73	2,09	2,86	3,17	3,45				
30	1,02	1,70	2,05	2,76	3,04	3,28				
50	1,01	1,68	2,01	2,68	2,94	3,16				
80	1,01	1,66	1,99	2,64	2,89	3,10				
100	1,01	1,66	1,98	2,63	2,87	3,08				
125	1,00	1,66	1,98	2,62	2,86	3,06				
200	1,00	1,65	1,97	2,60	2,84	3,04				
>200	1,00	1,65	1,96	2,58	2,81	3,00				
Die Werte für t in der letzten Zeile werden auch mit t_∞ bezeichnet.										

Anleitung zur Regression nach der "Methode der kleinsten Quadrate" in Excel

Für diesen Abschnitt sind keine Mathematik- oder Programmierkenntnisse notwendig. Das nachfolgende Beispiel lässt sich mit *LibreOffice* ebenfalls durchführen.

Bisher haben wir zwei einfache Beispiele zur Regression betrachtet: die lineare Regression sowie die exponentielle Regression. In den Naturwissenschaften und Technik gibt es jedoch physikalische Zusammenhänge, die sich nicht durch lineare/exponentielle Gesetzmäßigkeiten beschreiben lassen. Sie folgen etwas "komplizierteren" Gesetzmäßigkeit, welche mithilfe der Physik erklärt werden und mithilfe der Mathematik modelliert werden müssen.

Regression einer Amplitudenresonanz-Funktion

Das folgende Beispiel ist aus dem Physiklabor entnommen worden. Beim Versuch "Messungen am Pohlschen Drehpendel" werden freie und erzwungene, gedämpfte Schwingungen untersucht. Mithilfe eines mathematischen Modells – der Gleichung der Amplitudenresonanzfunktion – und der Messwerte wird eine Kurve an die Messwerte gefittet.

Hintergrundinformationen zum Experiment

Erzwungene Schwingungen kennen Sie vermutlich aus dem Alltag. Wenn Sie beispielsweise mit dem Auto fahren, überträgt Ihr Motor mechanische Schwingungen (Vibrationen) an die Karosserie. Bei einer bestimmten Drehzahl (= Frequenz) fängt der Innenraum an stärker zu vibrieren und es wird lauter. Die Frequenz, bei der die Vibration auftritt, wird als Resonanz- oder Eigenkreisfrequenz



Abbildung 41 Pohlsches Drehpendel. Quelle: Original uploader was Dbfls at fr.wikipedia - Transferred from fr.wikipedia; transferred to Commons by User:Bloody-libu using CommonsHelper., CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16040416

bezeichnet. Diese Vibrationen gehen bei höheren bzw. niedrigeren Drehzahlen wieder zurück.

Beim Pohlschen Drehpendel hat man eine Anordnung wie in der Abbildung 41 dargestellt. Ein Elektromotor treibt über eine Pleuelstange und eine Spiralfeder die Kupferscheibe an. Es kommt zu einer Pendelbewegung der Kupferscheibe, welche mithilfe einer Wirbelstrombremse (Elektromagnet) gedämpft werden kann.

Rotiert der Motor mit einer Frequenz, die in der Nähe der Resonanzfrequenz liegt, so kann man an der großen Skala beobachten, dass die Ausschläge der Kupferscheibe sehr groß werden. In diesem Fall ist die Resonanzbedingung erfüllt.

Der Verlauf des Ausschlags (sog. Normierte Amplitude $a(\omega)$) kann in Abhängigkeit der Motorfrequenz ω durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$a(\omega) = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4 \cdot \delta^2 \cdot \omega^2}}$$

Dabei ist ω_0 die Eigenkreisfrequenz, bei der die Resonanz auftritt und δ die Abklingkonstante. Trägt man $a(\omega)$ gegen ω für ein vorgegebenes ω_0 sowie unterschiedliche Abklingkonstanten auf, so ergibt sich ein Verlauf wie in Abbildung 42 dargestellt.



Abbildung 42 Verlauf einer Amplitudenresonanzfunktion bei verschiedenen Abklingkonstanten. Quelle: C. Lüders, Studienbuch Physik II, 2. Auflage, FH Südwestfalen, 2014

Im Experiment wird die Wirbelstrombremse bei verschiedenen Spannungen betrieben und gleichzeitig die Motorfrequenz variiert. Nach einer Einschwingphase werden die Amplitudenwerte an einer Skala abgelesen. Tabelle 14 enthält die Ergebnisse aus drei Messungen. Dabei wurde die Spannung der Wirbelstrombremse 2 V, 4 V und 8 V konstant gehalten.

ω _{2V} [1/s]	a(ω _{2ν}) [1/1]	ω _{4V} [1/s]	a(ω _{4ν}) [1/1]	ω _{8V} [1/s]	a(ω _{8ν}) [1/1]
1,75	1,00	1,38	1,00	2,00	1,00
2,25	1,00	1,89	1,00	2,46	1,50
2,68	1,60	2,35	1,50	2,91	2,50
3,18	3,80	2,90	2,75	3,22	3,50
3,39	8,20	3,35	7,50	3,34	4,25
3,48	20,4	3,48	12,75	3,46	4,50
3,50	38,0	3,56	17,75	3,59	5,50
3,62	25,4	3,64	14,75	3,73	4,75
3,83	6,00	3,85	6,25	3,91	3,75
4,08	3,00	4,37	2,00	4,36	1,50
4,33	1,80	4,83	1,00	4,84	0,75
4,59	1,00	5,24	0,50	4,83	0,50

Tabelle 14 Ergebnisse der Messungen mit dem Pohlschen Drehpendel.

Aus einem Schwingungsversuch konnte eine Eigenkreisfrequenz von $\omega_0 = 3,56 \, s^{-1}$ ermittelt werden.

Die Ergebnisse der Messungen aus Tabelle 14 sind in Abbildung 43 dargestellt. Man sieht, dass in der Umgebung von ω_0 die Amplitudenausschläge groß werden, je nach angelegter Spannung an der Wirbelstrombremse. Jenseits von ω_0 werden die Amplituden kleiner. In dieser Darstellung wurde bewusst auf eine Verbindung der Messpunkte mit Linien verzichtet. Im folgenden Abschnitt wollen wir eine nichtlineare Regression durchführen und mithilfe der Fitparameter die optimalen Kurven einzeichnen.



Abbildung 43 Darstellung der Messwerte für verschiedene Spannungen an der Wirbelstrombremse. Die Resonanz tritt bei einer Kreisfrequenz von ca. 3,6 s⁻¹ auf.

Ermittlung der Fitparameter mit Excel

Wir kennen die Modellgleichung, welche den Zusammenhang zwischen der Amplitude und der Kreisfrequenz beschreibt:

$$a(\omega) = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4 \cdot \delta^2 \cdot \omega^2}}$$

In dieser Gleichung sind zwei Parameter enthalten (ω_0 und δ), welche die Lage und die Form der Amplitudenresonanzfrequenzfunktion bestimmen. Diese Parameter können mithilfe einer Regression ermittelt werden.

Funktionsprinzip

Das Prinzip der Methode der kleinsten Quadrate ist in der Abbildung 44 schematisch dargestellt. Zunächst wird eine Gerade durch die Punkte hindurch gezeichnet. Anschließend wird die Differenz $(y_i - y_m)$ gebildet und quadriert. Die Flächeninhalte aller Quadrate werden zu einer Gesamtfläche aufsummiert. Durch Variation der Steigung der Geraden m ändert sich die Summe der Quadratflächen. Sie kann einen bzw. mehrere Extremwerte durchlaufen. Im Extremwert (hier: Minimum) hat die Gerade eine Steigung, bei der die Flächeninhalte und somit auch die Abstände des Messpunkts zur Geraden minimal werden. Dieses Prinzip lässt sich auf beliebige Modellgleichungen mit 2, 3 oder 5 Parameter übertragen. Je mehr Parameter es gibt, umso schwieriger wird es, eine optimale Kurve zu finden.



Abbildung 44 Prinzip der Fehlerquadrat-Minimierung. Es soll eine Gerade mit der Steigung m gefunden werden, bei der die Summe der Flächeninhalte der grauen Quadrate minimal wird.

Der Computer erledigt die oben beschriebenen Schritte iterativ. Er braucht einen Startwert als Vorgabe (z. B. eine Anfangssteigung m_0) und er probiert anschließend 5, 10, 100 oder mehrere Tausend Geradensteigungen aus, bis das Optimum gefunden worden ist.

Excel-Solver aktivieren

Für diese Art von Berechnung benötigen Sie das Excel Add-In namens "Solver". Der Solver ist in jeder Excel-Version dabei, ist aber meist deaktiviert. Zum Aktivieren des Solvers klicken Sie auf

 $Datei \rightarrow Optionen \rightarrow Add-Ins$

Bei "Verwalten" klicken Sie auf die Schaltfläche "Gehe zu". Im nachfolgenden Fenster klicken Sie auf die Schaltfläche "Solver" und schließen das Fenster mit einem Klick auf "OK". Starten Sie Excel neu.

Der Solver sollte nach dem Neustart im Ribbon-Menü "Daten" auf der rechten Seite auftauchen.

Seitenlayout	Fo	meln	Daten	Üb rprüfen	Ansicht						_
n Vorhand Verbindu en	dene ingen a	Alle	Eig eren + 🕬 Ver Verbin	<mark>bin</mark> dungen enschaften knüpfungen be idungen	arbeiten	pierung heben + Gliv	Teilergebnis ederung	●를 Detail anzeige ■를 Detail ausblen	len Fa	Analyse	5
,	D		F	F	c	0	R	s		т	
Г [s]	Amplituden A links [Skt]		4		5						
8V	2\	1	4V	8V							
31,41	0,5	5	0,4	0,4							

Vorbereitung der Daten und Durchführung der Regression

Erstellen Sie eine	Tabelle wie in	der nachfolgen	den Abbildung	(links)	dargestellt.
		0		· · ·	<u> </u>

Zwischenablage 🕞			Schriftart 🕞			- Fa	_
	S68	-	f_x				
	А	В	С		D		
40	ω _{4V} [1/s]	$a(\omega_{4V})$ [1/1]	a _{Model}		FQ (a(ω_{4v})	-a _{Modell}) ²	
41	1,38	1,00					
42	1,89	1,00					
43	2,35	1,50					
44	2,90	2,75					
45	3,35	7,50					
46	3,48	12,75					
47	3,56	17,75					
48	3,64	14,75					
49	3,85	6,25					
50	4,37	2,00					
51	4,83	1,00					
52	5,24	0,50					
53			Summe de	er FQ			
54							
55							
56							
57	Startwerte						
58	ωο	1,00					
59	δ	0,10					
60							

Zwischenablage 🕞			Schrif	itart 🕠
	O64	• (*	f_{sc}	
1	А	В	С	D
40	ω _{4V} [1/s]	a(ω _{4v}) [1/1]	a _{Modell}	FQ $(a(\omega_{4V})-a_{Modell})^2$
41	1,38	1,00	1,0640	0,004
42	1,89	1,00	0,3871	0,376
43	2,35	1,50	0,2208	1,636
44	2,90	2,75	0,1345	6,841
45	3,35	7,50	0,0975	54,796
46	3,48	12,75	0,0896	160,287
47	3,56	17,75	0,0856	312,030
48	3,64	14,75	0,0814	215,169
49	3,85	6,25	0,0722	38,165
50	4,37	2,00	0,0551	3,783
51	4,83	1,00	0,0447	0,913
52	5,24	0,50	0,0378	0,214
53			Summe der FQ	794,213
54				
55				
56				
57	Startwerte			
58	ωο	1,00		
59	δ	0,10		
60				

Die erste Spalte enthält die gemessenen Kreisfrequenzen ω für eine Spannung an der Wirbelstrombremse von 4 V, die zweite Spalte enthält die normierten Amplituden aus Tabelle 14. In die 3. Spalte wird $a(\omega)$ eingesetzt, wobei für die Parameter ω_0 und δ feste Werte vorgegeben werden:

$$a_{\text{Modell}} = \frac{(1,00)^2}{\sqrt{(\omega_{4V}^2 - (1,00)^2)^2 + 4 \cdot (0,10)^2 \cdot \omega_{4V}^2}}$$

In die letzte Spalte werden die Differenzen $a(\omega_{4V})$ und a_{Modell} gebildet und anschließend quadriert. In der Zeile "Summe der FQ" werden die Flächeninhalte der Quadrate (FQ) aus den darüber liegenden Zellen summiert.

Klicken Sie auf das Ribbon "Daten" und anschließend auf Solver. Geben Sie im Fenster "Solver-Parameter" die Daten wie im unteren Bild angedeutet an. Das Ziel ist die Zelle mit der Summe der Fehlerquadrate. Variablenzellen sind die Zellen mit Startwerten für ω_0 und δ . Klicken Sie auf das Feld "Min" und klicken Sie auf die Schaltfläche "Lösen".

50	4,37	2,00	0,0551	3,/83				
51	4,83	1,00	0,0447	0,913				
52	5,24	0,50	0,0378	0,214				
53			Summe der FQ	794,213				
54								
55			Solver-P	arameter				
56								
57	Startwerte							
58	ω _o	1,00	Zie	Ziel festlegen: \$D\$53				
59	δ	0,10	Pie			·		
60			DIS	• <u>M</u> ax.	Min. ()	🗇 <u>W</u> ert:		
61			Du	Durch Ändern von Varia <u>b</u> lenzellen:				
62			\$8	\$58: \$ 8\$59				
63								
64			Uni	Unterliegt den Nebenbedingungen:				
65								
66								

Nach wenigen Sekunden erfolgt eine Antwort. Sollten in den Startwert-Zellen unrealistische Werte auftauchen (z. B. > 10000), dann müssen Sie die Startwerte etwas anpassen. Für ω_0 wäre ein Startwert von 3,0 gut, für δ vermutlich 0,1.



Ist die Berechnung geglückt, fragt der Solver, ob Sie die Lösung akzeptieren. Ist das der Fall, werden die Fitparameter in die Zellen der Startwerte geschrieben. Nun lässt sich die Amplitudenresonanzfunktion konstruieren.

Neu hinzugekommen sind Spalten E und F, wie in der unteren Abbildung dargestellt. Spalte E enthält insgesamt 420 ω -Werte im Bereich von 1,3 s⁻¹ bis 5,5 s⁻¹ mit einem Inkrement von 0,01 s⁻¹. Je kleiner das Inkrement, desto höher ist die Auflösung der dargestellten Kurve. Die Spalte F enthält die Amplitudenresonanzfunktion mit den soeben ermittelten Parametern. Diese sind gegeben mit $\omega_0 = 3,581$ und $\delta = 0,101$. Ein Vergleich zwischen einer interpolierten Kurve (verbundene Messpunkte) und einer gefitteten ist in den Abbildung 45 und Abbildung 46 sichtbar. Das vollständige Ergebnis aller Messkurven inklusive aller Fitparameter ist in der Abbildung 47 sichtbar.

Zwischenablage 🕞			Schriftart 🖓		Ausrichtung		
Diagramm 3 🔹 💌			f_x				
	А	В	С	D	E	F	
40	ω _{4V} [1/s]	a(ω _{4v}) [1/1]	a _{Modell}	FQ $(a(\omega_{4v})-a_{Modell})^2$	ω	a(ω)	
41	1,38	1,00	1,1734	0,030	1,3	1,1514561	
42	1,89	1,00	1,3825	0,146	1,31	1,15415497	
43	2,35	1,50	1,7484	0,062	1,32	1,15688733	
44	2,90	2,75	2,8829	0,018	1,33	1,15965355	
45	3,35	7,50	7,4044	0,009	1,34	1,16245404	
46	3,48	12,75	13,1256	0,141	1,35	1,16528918	
47	3,56	17,75	17,4568	0,086	1,36	1,16815939	
48	3,64	14,75	14,9881	0,057	1,37	1,17106508	
49	3,85	6,25	5,9868	0,069	1,38	1,17400668	
50	4,37	2,00	2,0183	0,000	1,39	1,17698462	
51	4,83	1,00	1,2122	0,045	1,4	1,17999933	
52	5,24	0,50	0,8767	0,142	1,41	1,18305128	
53			Summe der FQ	0,805	1,42	1,1861409	
54					1,43	1,18926868	
55					1,44	1,19243508	
56					1,45	1,19564059	
57	Startwerte				1,46	1,19888571	
58	ωο	3,581			1,47	1,20217094	
59	δ	0,101			1,48	1,20549678	
60					1,49	1,20886378	



Abbildung 45 Negativbeispiel einer Amplitudenresonanzkurve, bei der die Messpunkte mit Linien verbunden worden sind. Diese Form der Darstellung ist in der Auswertung nicht erlaubt und auch nicht mathematisch korrekt.



Abbildung 46 Ergebnis der nichtlinearen Regression für die Messung der Resonanzfrequenz bei 4 V.



Abbildung 47 Endergebnis der Regression aller drei Messkurven.

Schlusswort

Damit sind wir am Ende dieser Anleitung angekommen. Ich wollte mich eigentlich kurz fassen, aber am Ende wurden es doch 60+ Seiten, da ich versucht habe, möglichst viele Beispiele und Tipps zu geben. Sollten Sie sich diese Anleitung durchgelesen haben, müssten Sie in etwa eine Vorstellung davon haben, was auf Sie zukommt.

Falls nicht, dann sollten Sie sich zumindest die Checklisten im Anhang dieser Anleitung anschauen. Somit bleibt Ihnen das mühsame spannende Lesen erspart und Sie können diejenigen Stellen in der Anleitung nachschlagen, die für Sie relevant sind.

Ich hoffe, dass Sie das Physiklabor erfolgreich absolvieren und wünsche Ihnen viel Erfolg im Studium!