



Polarisation und Doppelbrechung

1 Lernziele

Wellencharakter des Lichts, verschiedene Polarisationszustände, Polarisationskontrolle, Doppelbrechung

2 Vorausgesetzte Kenntnisse

1. Laserschutz und Umgang mit Lasern
2. Longitudinal- und Transversalwellen
3. Geschwindigkeit, Frequenz, Wellenlänge von Licht
4. Was „schwingt“ beim Licht?
5. Lineare, zirkulare und elliptische Polarisationszustände
6. Erzeugung von polarisiertem Licht; $\lambda/4$ -Plättchen
7. Das Gesetz von Malus
8. Polarisiertes Licht in der Natur und in Anwendungen
9. Optische Anisotropie, Doppelbrechung
10. Optisches Drehvermögen

3 Literatur

- Demtröder: *Experimentalphysik Bd. 2: Elektrizität und Optik*
- Paus: *Physik in Experimenten und Beispielen*
- Eichler, Kronfeldt, Sahm: *Das neue physikalische Grundpraktikum*
- Bergmann, Schaefer: *Lehrbuch der Experimentalphysik Bd. 3: Optik*

HINWEIS: Viele Bücher lassen sich online unter <http://ebooks.ulb.tu-darmstadt.de/> herunterladen.

Beachten Sie auch das Merkblatt zum **Laserschutz** auf den Webseiten des Grundpraktikums!

4 Grundlagen

4.1 Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen, d. h. ihre Feldvektoren schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, welche aus einer Kopplung der elektrischen und magnetischen Felder entsteht. Diese Kopplung wird durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben, auf die aber in diesem Versuch nicht näher

eingegangen werden soll. Zur Beschreibung des Wellencharakters von Licht dienen die drei Größen Wellenlänge, Lichtgeschwindigkeit und Frequenz, welche über folgende Gleichung miteinander verknüpft sind:

$$c = \lambda \cdot \nu, \quad (1)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit, λ die Wellenlänge und ν die Frequenz ist.

4.2 Polarisation

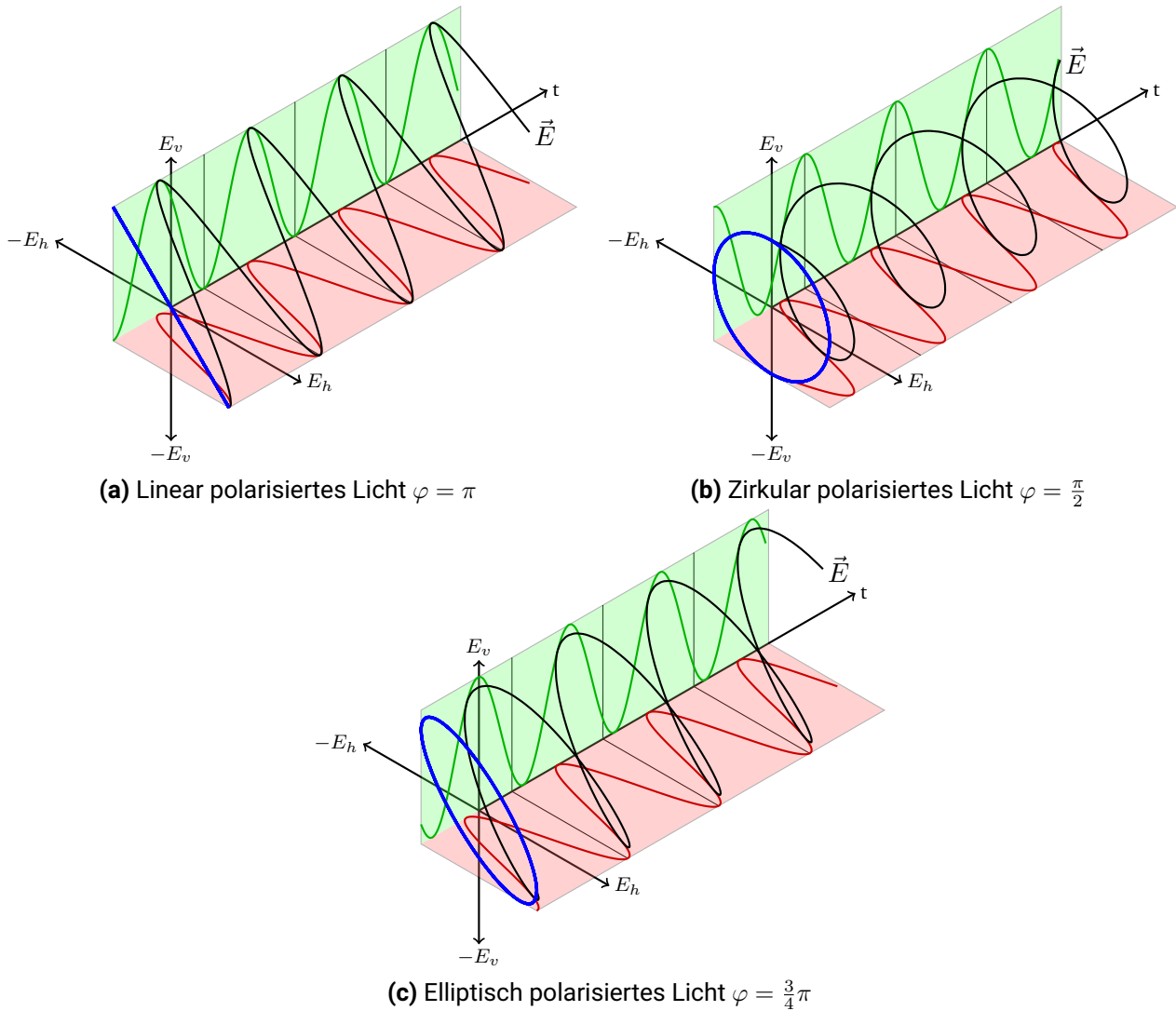


Abbildung 1: Darstellung verschiedener Polarisationszustände

Es gibt verschiedene Polarisationszustände: Linear, zirkular und elliptisch. Man kann jeden Polarisationszustand als Superpositionen der anderen Polarisationszustände darstellen: So lässt sich eine zirkular oder elliptisch polarisierte Welle durch Überlagerung zweier linear polarisierter Wellen, $E_h = E_x \cos(\omega t)$ und $E_v = E_y \cos(\omega t + \varphi)$, bilden. Diese beiden Wellen sind horizontal, bzw. vertikal ausgerichtet und somit senkrecht zueinander. Hierbei sind E_x und E_y die Amplituden, ω die Kreisfrequenz und φ eine beliebige Phasendifferenz zwischen den beiden Wellen. Betrachten Sie hierzu in Abb. 1a bis c die horizontal (E_h , grün) und vertikal (E_v , rot) linear polarisierte Welle, sowie deren Superposition (schwarz). Blau ist die namensgebende Projektion des E-Feld Vektors auf die x-y-Ebene im Mittel über die Zeit.

In Abb. 1a ist eine linear polarisierte Welle gezeigt. Die beiden Wellen E_h (rot) und E_v (grün) sind in diesem Beispiel um $\varphi = \pi$ phasenverschoben und haben die gleiche Amplitude $E_x = E_y$. Daraus ergibt sich eine resultierende Welle, welche um 45° gegenüber der Horizontalen geneigt ist (schwarz).

Zirkular polarisiertes Licht lässt sich auch als Superposition zweier linear polarisierter Wellen darstellen. Hierzu müssen die Amplituden E_x und E_y gleich sein und die Phasenverschiebung φ einen Betrag von $\frac{\pi}{2}$ aufweisen. Siehe Abb. 1b als Beispiel. Hier ist die Welle links-zirkular polarisiert, denn beim Blick in den Strahl läuft der E-Feld Vektor links herum.

In Abb. 1c wird elliptisch polarisiertes Licht durch die Superposition zweier linear polarisierter Wellen mit gleicher Amplitude aber mit einer Phasenverschiebung $\varphi \neq n \cdot \frac{\pi}{2}$ erzeugt.

4.3 Erzeugung von polarisiertem Licht

Es gibt zahlreiche Effekte in der Natur und Technik, die den Polarisationszustand von Licht beeinflussen. Licht von *spontan* emittierenden Quellen ist eine wilde Mischung aus Wellenzügen aller möglichen Polarisationsvarianten, die man einfach „unpolarisiertes Licht“ nennt. Durch nachfolgende Selektion lässt sich daraus *polarisiertes* Licht gewinnen. Die wohl einfachste Methode bedient sich der *Reflexion* an einer ebenen Grenzfläche zu einem durchsichtigen Material mit größerem Brechungsindex, da das Reflexionsvermögen nicht nur vom Einfallswinkel, sondern auch vom Polarisationszustand abhängt. Lässt man Licht im sog. Brewsterwinkel auftreffen, so ist das reflektierte Licht linear polarisiert. Auch bei der *Streuung* (Beispiel: das Blau des Tageshimmels) tritt Polarisation auf, da das Streuvermögen von der Polarisationsrichtung relativ zum Streuwinkel abhängt – ähnlich wie bei der Reflexion. Eine weitere Möglichkeit Licht zu polarisieren stellt die *Absorption* dar. Manche Polymere absorbieren bevorzugt eine Polarisationsrichtung, das durchgelassene Licht ist weitgehend linear polarisiert.

4.4 Doppelbrechung

Doppelbrechende Medien unterscheiden sich von normalen Stoffen dadurch, dass sie zwei Brechungsindizes besitzen, da in ihnen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes von der Ausbreitungsrichtung und der Polarisation abhängt. Ein einfallender Lichtstrahl wird in zwei Strahlen unterschiedlicher Polarisation aufgeteilt. Dies kann man zur Konstruktion von Polarisatoren oder z. B. $\lambda/4$ -Plättchen ausnutzen.

4.5 Optisches Drehvermögen

Auch in Medien mit optischem Drehvermögen gibt es zwei Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichtes. Diese hängen vom Schraubensinn der Lichtwelle ab. Die Schwingungsrichtung linear polarisierten Lichtes wird beim Durchgang durch solche Medien „weitergedreht“. Im Gegensatz zur optischen Anisotropie ist optisches Drehvermögen auch in isotropen Medien (Flüssigkeit, Gas) möglich, Zuckerlösungen sind dafür ein Beispiel.

5 Hausaufgaben

Vor dem Praktikumstermin zu Hause zu erledigen:

1. Leiten Sie das Gesetz von Malus her (Rechnung). Zeichnen Sie außerdem die Intensität als Funktion des Winkels einmal in kartesischen sowie in Polarkoordinaten.
2. Wie verändert sich eine linear polarisierte Welle mit konstantem Phasenwinkel $|\varphi| = \pi$ (45° gegenüber der Horizontalen geneigt), wenn die Amplituden nicht mehr gleich sind ($E_x > E_y$)? Zeichnen Sie hierzu ein Schnittbild der E-Feld Vektoren über eine Periode gemittelt wie in Abb. 1a blau dargestellt und tragen Sie dort die Komponenten E_x und E_y ein.
3. Wie verändert sich eine zirkular polarisierte Welle bei konstantem Phasenwinkel $|\varphi| = \frac{\pi}{2}$, wenn die Amplituden nicht mehr gleich sind ($E_x \neq E_y$)? Machen Sie sich den Sachverhalt abermals anhand eines Schnittbildes klar.
4. Was passiert mit elliptisch polarisiertem Licht, wenn bei konstanter Phasenverschiebung $\varphi \neq n \cdot \frac{\pi}{2}$ die Amplituden so verändert werden, dass $E_x \neq E_y$ gilt? Kann damit elliptisch polarisiertes Licht in andere Polarisationszustände überführt werden?
5. a) Wie in Abschnitt 4.4 erklärt wurde erzeugt ein $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen eine Phasenverzögerung zwischen ordentlichem und außerordentlichem Strahl. Angenommen es fällt linear polarisiertes Licht auf das Plättchen (Schwingungsebene in der x-z-Ebene). Wie groß sind die Anteile der E-Feldkomponenten im ordentlichen und außerordentlichen Strahl für einen Einfall unter 0° , 45° und 22.5° zwischen Schwingungsebene des Lichts und optischer Achse des $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchens? Fassen Sie dazu die Doppelbrechung des Plättchens als Projektion der E-Feldkomponenten auf dessen optischen Achsen auf.
b) Nach Verlassen des $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchens liegt nun eine Phasenverschiebung von $\frac{\pi}{2}$ zwischen ordentlichem und außerordentlichem Strahl vor. Fassen Sie die Kurve, auf welcher der Vektor des elektrischen Feldes in der x-y-Ebene umläuft, als Lissajous-Figur auf. Welche Figuren ergeben sich für die Fälle von 0° , 45° und 22.5° zwischen der Schwingungsebene des einfallenden Lichts und den optischen Achsen des $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchens?
c) Zur Untersuchung des Polarisationszustands passiert das Licht nach dem $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen einen drehbaren Polarisationsfilter. Überlegen Sie, wie die Intensität hinter dem Polarisationsfilter für verschiedene Ausrichtungen des Polarisationsfilters gegeben ist. Tragen Sie die Intensität hinter dem Polarisationsfilter in einem Polardiagramm über den Drehwinkel des Polarisationsfilters auf. Welche Polardiagramme ergeben sich für die Fälle von 0° , 45° und 22.5° zwischen der Schwingungsebene des einfallenden Lichts und den optischen Achsen des $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchens?
d) Ausgehend von Aufgabenteil c): Welche Information liefert Ihnen das Verhältnis der beiden Halbachsen wenn elliptisch polarisiertes Licht vorliegt?

6 Präsenzaufgaben

Bitte die Hinweise zum Umgang mit Lasern beachten – Punkt 1 der vorausgesetzten Kenntnisse!

1. Machen Sie sich mit dem Versuchsaufbau und den optischen Komponenten vertraut.
 - a) Identifizieren Sie die Polarisatoren und das $\lambda/4$ -Plättchen. Wie können Sie dies einfach tun?
 - b) Wo können Sie im Versuchsraum polarisiertes Licht beobachten? Können Sie das Gesetz von Malus verifizieren?
2. Präparieren Sie mit Hilfe des $\lambda/4$ -Plättchens zirkular und elliptisch polarisiertes Licht.
 - a) Bestimmen Sie jeweils den/die Winkel, der gebildet wird aus Schwingungsebene der Laser-Lichtwelle und den Hauptachsen des $\lambda/4$ -Plättchens.
 - b) Mit welcher Präzision können Sie mit den vorhandenen Komponenten zirkular polarisiertes Licht herstellen? Welche Bauteile haben darauf maßgeblichen Einfluss?
 - c) **Für Interessierte:** Können Sie aus Ihrer Messung den Schraubensinn des Lichtes bestimmen? Wenn ja, mit welchem Ergebnis? Wenn nein, warum nicht?
3. Zur Vermessung des optischen Drehvermögens von Quarz, tauschen Sie hierzu das $\lambda/4$ -Plättchen gegen den Quarzkristall aus. Als Komplikation ist Quarz auch doppelbrechend.
 - a) Wie liegt die optische Achse des Kristalls zum Strahlengang?
 - b) Vermessen Sie das optische Drehvermögen der drei zur Verfügung stehenden Quarze (I: 2 mm Dicke, II: 5 mm, III: 9 mm)
 - c) Lässt sich entscheiden, ob Ihr Quarz links- oder rechtsdrehend ist?

7 Versuchsdurchführung

7.1 Aufbau

Im Versuch stehen Ihnen einen Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 650 nm als Lichtquelle, eine Photodiode als Detektor und mehrere optisch wirksame Elemente zur Verfügung. Die Eigenschaften dieser Elemente sollte nach der Vorbereitung klar sein und während des Versuchs überprüft werden.

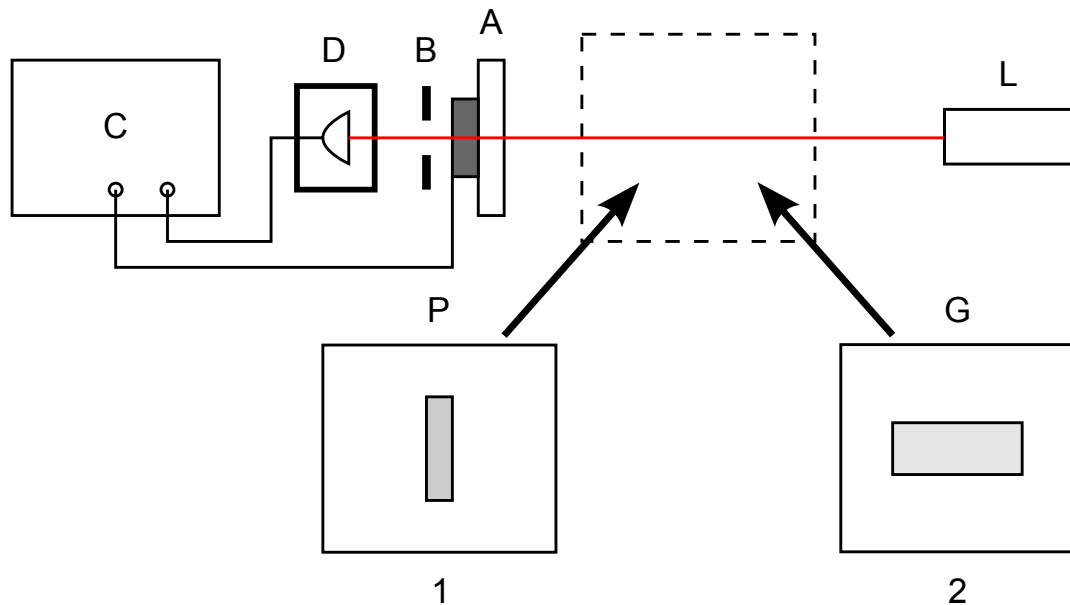


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau

7.2 Hinweise zur Durchführung

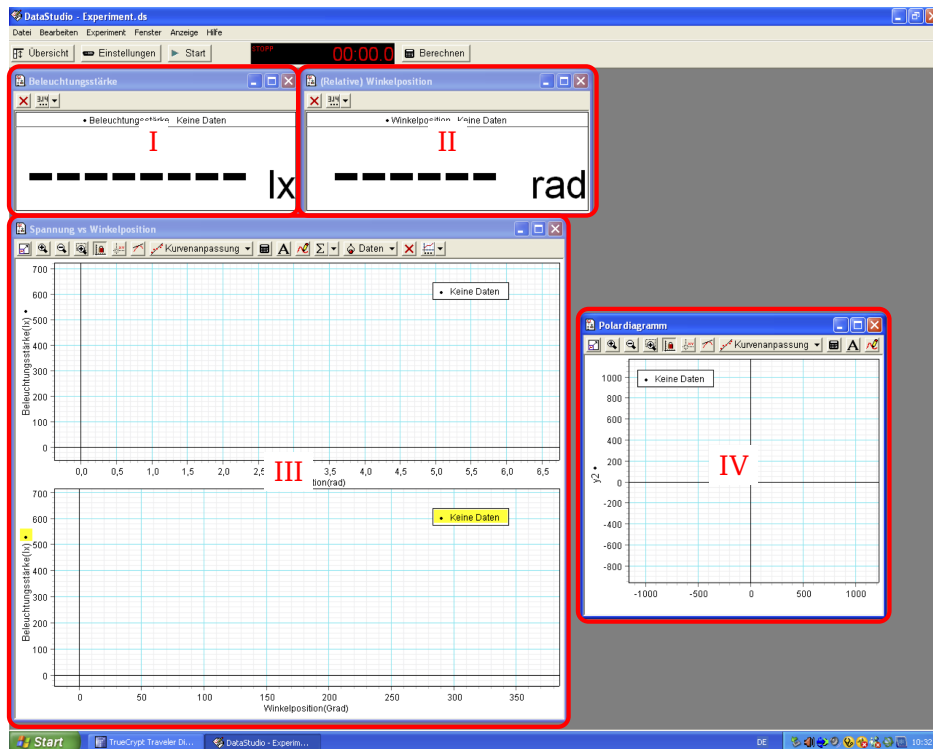
- *Es dürfen keine spiegelnden oder gerichtet reflektierenden Gegenstände in den Laserstrahl gebracht werden (Laserstrahl beim Austausch von Komponenten abblocken; Ringe, Uhr, etc. ausziehen)!*
- Bitte fügen Sie den einzelnen Diagrammen Ihre Gruppennummer hinzu (siehe hierzu Abschnitt A.3). Sonst geht Ihr Ausdruck nachher eventuell verloren.
- Vor der ersten Messung sollten Sie die Einstellung der Blende überprüfen. Ist sie zu weit offen, erreicht die Photodiode die Sättigung, das verfälscht die Messdaten. Ist sie zu eng, ist das Detektorsignal zu schwach, und Sie erhalten kaum verwertbare Daten. Zum Einstellen der Blende beobachten Sie den Verlauf des vom Detektor gelieferten Signals für dessen Beleuchtungsstärke, während Sie einfach am Analysator drehen. Man vergrößert zunächst die Blende soweit, bis sich Plateaus im Detektor-Signal einstellen, und verkleinert sie dann auf eine vertretbare Größe.
- Das Messprogramm protokolliert keine absoluten Winkelpositionen, nur relative. Es ist daher zu empfehlen (aber nicht notwendig), *vor jeder Messung auf eine Startposition zu drehen, wo die Intensität ein Minimum erreicht hat.* Die Bilder bekommen dadurch eine vergleichbare Form.

A Anhang

A.1 Allgemein

In diesem Experiment wird ein Computer zur Erfassung und Darstellung der Messdaten verwendet. Da es keinerlei Möglichkeit gibt, sich damit bereits vor dem Versuchstermin vertraut zu machen, ist hier eine kleiner Überblick. Bei Bedarf hilft vor Ort auch der Betreuer weiter.

Das Programm wird mit einem Doppelklick auf das Symbol „Experiment“ auf dem Windows Desktop gestartet. Nach dem Ladebildschirm erscheint folgendes Fenster:



In diesem Bild befinden sich links oben die zwei Fenster (I und II), die das momentane Mess-Wertepaar (Beleuchtungsstärke, Winkel) anzeigen. Der Nullpunkt ist *nicht* fest mit der Hardware verknüpft: Bei jedem Start einer Messung wird die Winkelangabe auf Null gesetzt, nachfolgende Werte werden ab der Startposition gezählt. Darunter befinden sich links Auftragungen der Beleuchtungsstärke über der Winkelposition – letztere einmal in Radiant und einmal in Winkelgrad (Feld (III)). Dieselben Daten erscheinen im Feld (IV) als Graph in Polarkoordinaten. Graphen (III) und (IV) sind Grundlage der weiteren Auswertung, Ausdrücke davon dienen als Messprotokoll. Es sind alle Sensoren bereits registriert und es kann sofort eine Probemessung gestartet werden. Dies ist zu empfehlen um sich mit dem Programm vertraut zu machen.

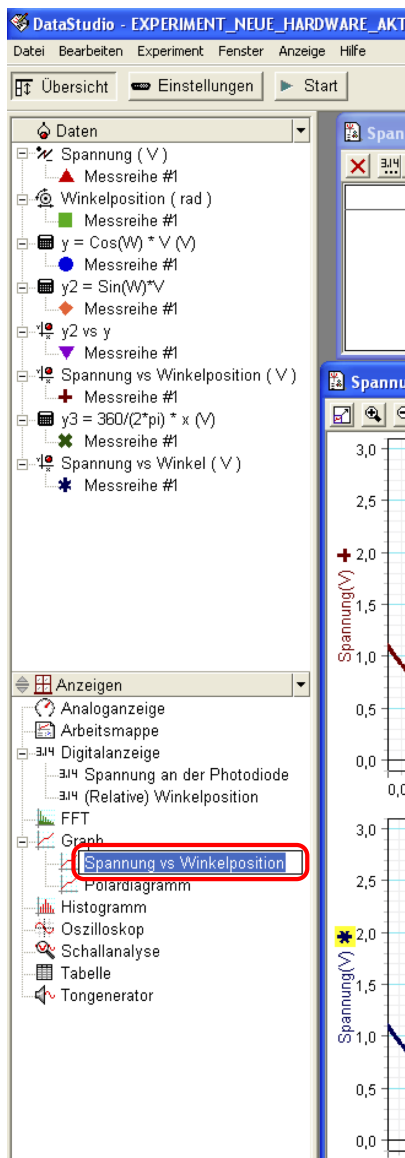
A.2 Messungen durchführen

Eine neue Messung kann durch Klick auf den „Start“-Knopf in der oberen Leiste (neben „Übersicht“) aufgenommen werden. Diese Daten werden dann entsprechend in die Diagramme eingetragen. Sollen die momentanen Messdaten nur zur Ansicht dargestellt werden, dann genügt ein Klick auf „Experiment“ (in der oberen Werkzeugleiste) und danach auf „Datenmonitor“. Beendet wird die Aufnahme durch einen Klick auf den „Stop“-Knopf, welcher bei laufender Datenaufnahme anstelle des „Start“-Knopfes zu sehen ist. War nur der „Datenmonitor“ aktiv, werden die Daten nun automatisch aus den Diagrammen gelöscht.

A.3 Umbenennen der Graphen

Damit Sie die Ausdrücke Ihrer Graphen im gemeinsamen Papierstapel wiederfinden, sollten Sie die Graphen mit Ihrer Gruppen-Nummer versehen. Das geht wie folgt:

- Klick auf „Übersicht“
- Auswahl des Graphen in der erscheinenden Leiste durch *einfachen* Klick in das Namensfeld des Graphen
- neuen Namen eintragen
- Klick auf „Übersicht“



Anmerkung:

Beim Klick auf den Knopf „Übersicht“ erscheint die links gezeigte Leiste mit weitaus mehr Einstellungsmöglichkeiten als denen, die für den Versuch benötigt werden. Änderungen an unpassender Stelle können zu falscher Darstellung der Graphen führen.

A.4 Löschen von Messdaten

Vor einer neuen Messung empfiehlt es sich, die alte Messung auszudrucken und danach zu löschen – anderenfalls werden mehrere Messungen in ein- und denselben Graphen eingetragen. Gelöscht wird wie folgt:

- Klick auf „Experiment“ in der oberen Werkzeugleiste
- Je nach Bedarf klicken Sie auf „Letzte Messreihe löschen“ oder „ALLE Datensätze löschen“

