



Bergische Universität Wuppertal
Fachbereich Physik
Lehrerfortbildung

Physikalische Versuche im Schulunterricht

H. Wilhelm
C. Zeitnitz

3. November 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Kurze Einführung in die Benutzung des Scopes	1
2	Die Fallröhre – Induzierte Spannung in Spulen	5
2.1	Benötigte Geräte	5
2.2	Der Versuch	5
2.3	Verwendung der Fallröhre	6
2.3.1	Auswertung – Bestimmung der terrestrischen Fallbeschleunigung . .	21
2.3.2	Justage der Spulenringe auf der Kunststoffröhre	22
2.3.3	Messungenauigkeiten und deren Auswirkungen	22
3	Das Pendel	24
3.1	Benötigte Geräte	24
3.2	Theorie zum Versuch	24
3.3	Versuchsaufbau	26
3.4	Durchführung	28
3.4.1	Beispielrechnung	29
4	Messung minimaler Ströme – am Beispiel elektrischer Leitfähigkeit von Luft	30
4.1	Benötigte Geräte	30
4.2	Der Versuch	30
4.3	Durchführung	31
4.3.1	Auswertung – Bestimmung des Leckstroms	33
5	Ladung auf einen Kondensator schaufeln	36
5.1	Benötigte Geräte	36
5.2	Der Versuch	36
5.3	Durchführung	36
6	Pulsmessung mit einer Infrarotlichtschranke	39
6.1	Benötigte Geräte	39
6.2	Der Versuch	39
6.3	Durchführung	41

7	Impulsübertrag	45
7.1	Benötigte Geräte	45
7.2	Der Versuch	45
7.3	Durchführung	47

1 Einleitung

In den hier beschriebenen Versuchen kommen die an der Bergischen Universität Wuppertal entworfene *Operationsverstärker*-, sowie die *USB-Interface-Box* zur Anwendung. Eine Einführung in die Benutzung dieser beiden Geräte findet sich im Internet auf der Seite <http://lehrerfortbildung.physik.uni-wuppertal.de/> unter **Projekte**. Informationen zur Installation, sowie zur Benutzung der verwendeten *LabView*-Programme (*Pendel*, *DVM*, *Impulsübertrag*) sind ebenfalls auf der o.a. Seite erhältlich. Ein Software-Komplettpaket kann (mit Ausnahme des Software-Oszillographen *Scope*, welches unten auf der Webseite gesondert aufgeführt ist) unter *USB-Datenerfassung* → *Anwendungspaket* heruntergeladen werden.

1.1 Kurze Einführung in die Benutzung des Scopes

Das *Scope* kommt bei der Auswertung der Pulssignale bei den Versuchen *Fallröhre* und *Fingerpulssensor* zur Anwendung. Nachdem die USB-Box mit dem PC verbunden und das Programm aktiviert wurde, muss im *Scope* zunächst die USB-Box als Signalquelle angegeben werden. Normalerweise wird das angeschlossene Gerät erkannt und ein neues Fenster *Kanalauswahl* taucht auf, indem die verwendeten USB-Box-Kanäle bestimmt werden können (Abb. 1, 2).

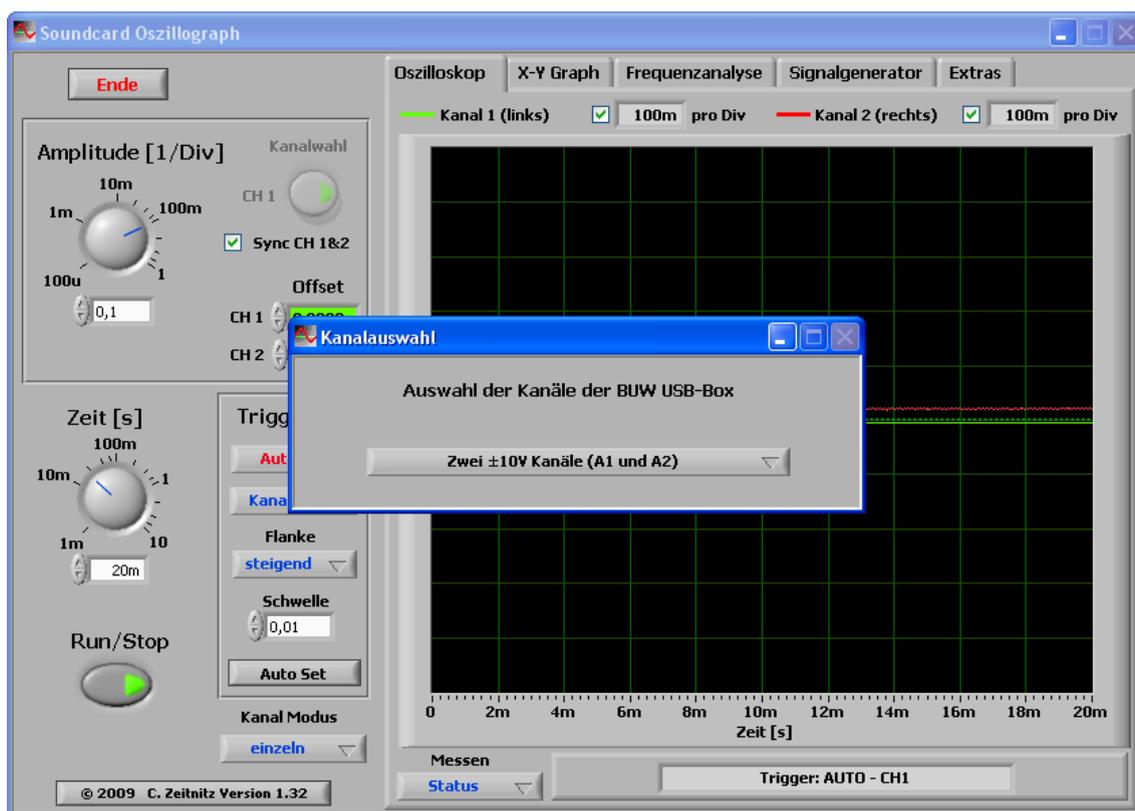


Abbildung 1: *LabView-Scope*: Beim Anschließen einer *USB-Box* erscheint für gewöhnlich ein neues Fenster „*Kanalauswahl*“, indem die verwendeten *USB-Box*-Kanäle bestimmt werden können.

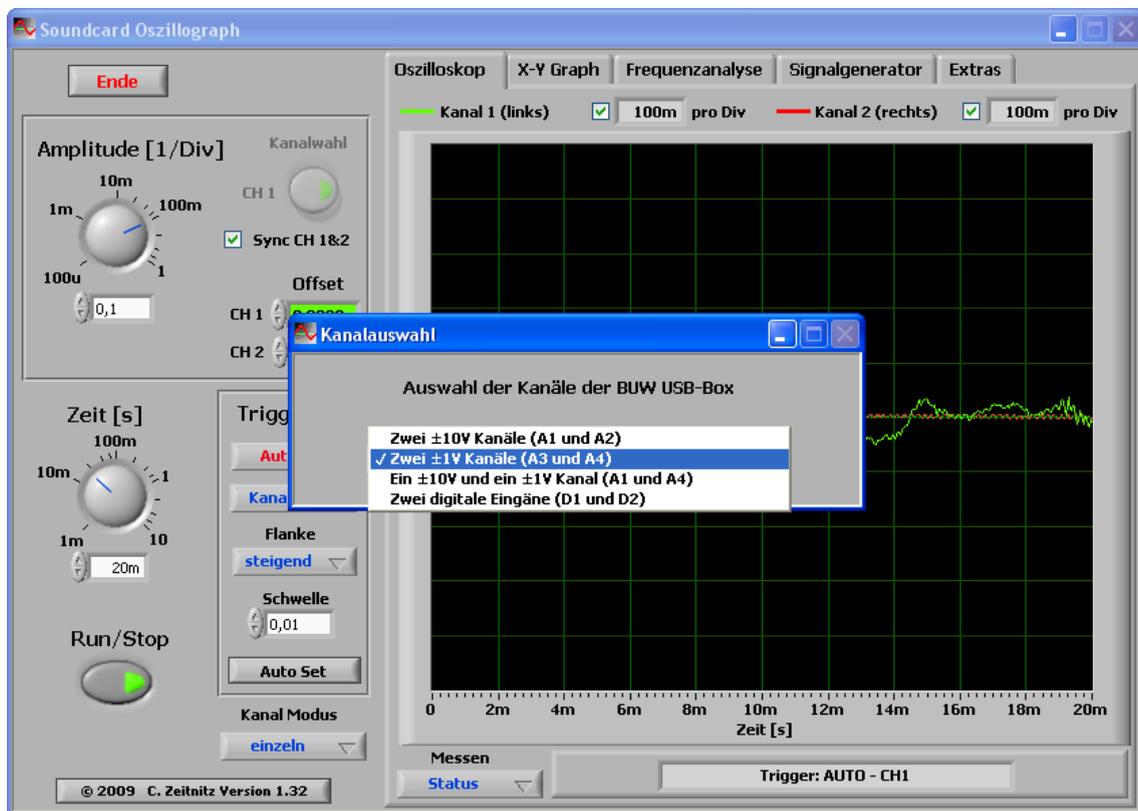


Abbildung 2: Auswahl der verwendeten USB-Box-Kanäle

Die verwendete USB-Box kann auch direkt ausgewählt werden: Hierzu ist der Reiter *Extras* zu wählen (s. Abb. 3) und hier unter *Audio Geräte* → *Aufnahme* die verwendete USB-Box auszuwählen. Es erscheint das Fenster (*Kanalauswahl*), indem wiederum die verwendeten USB-Box-Kanäle bestimmt werden können (Abb. 4).

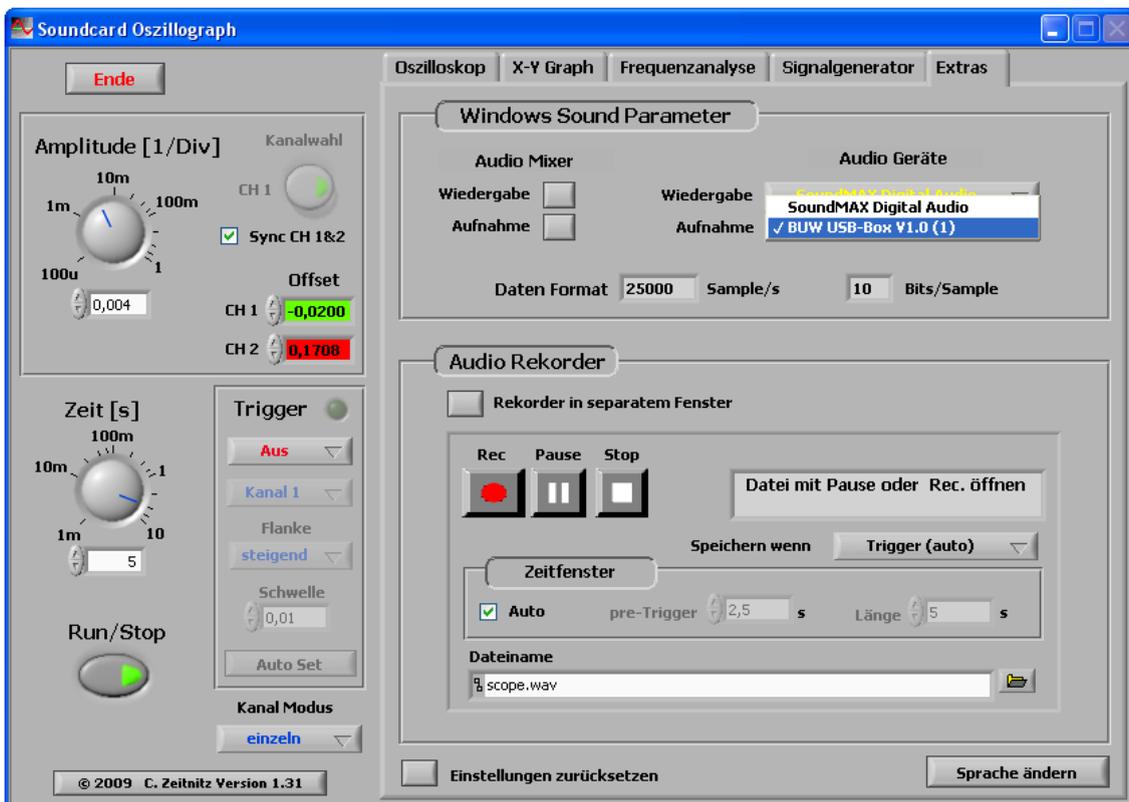
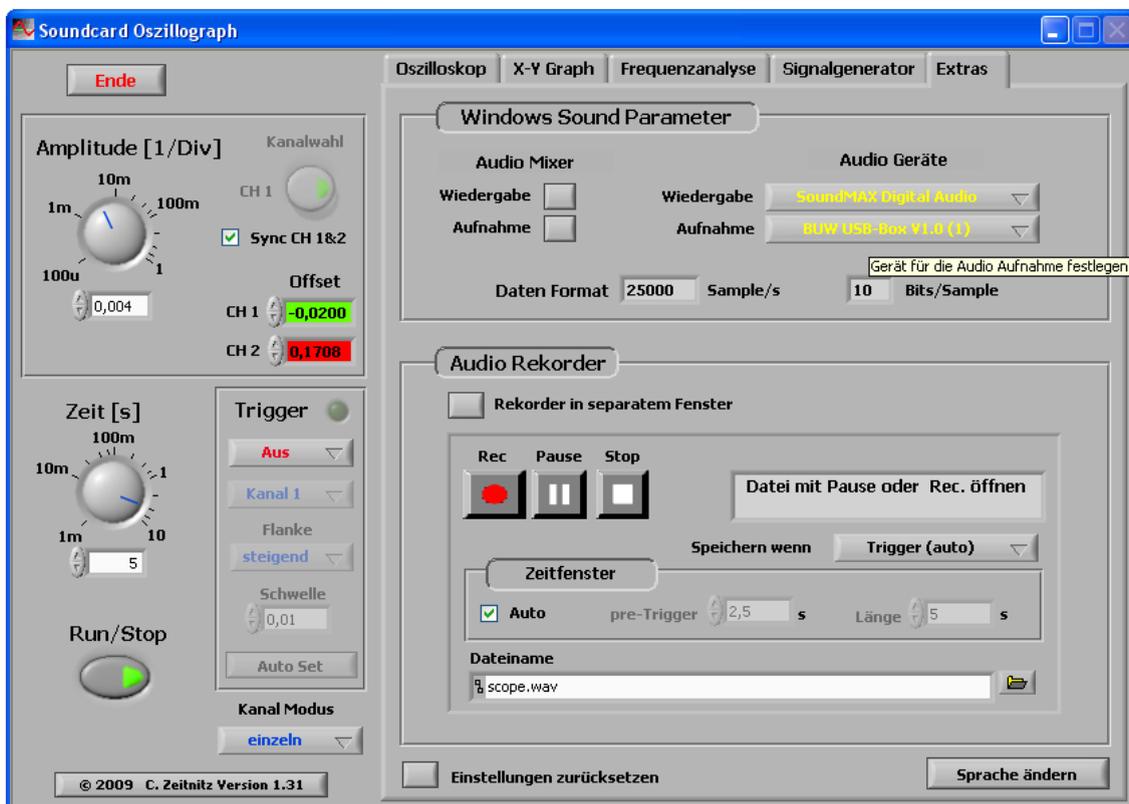


Abbildung 3: Festlegen des verwendeten Aufnahmegerätes (USB-Box) im Scope (Audio Geräte → Aufnahme)

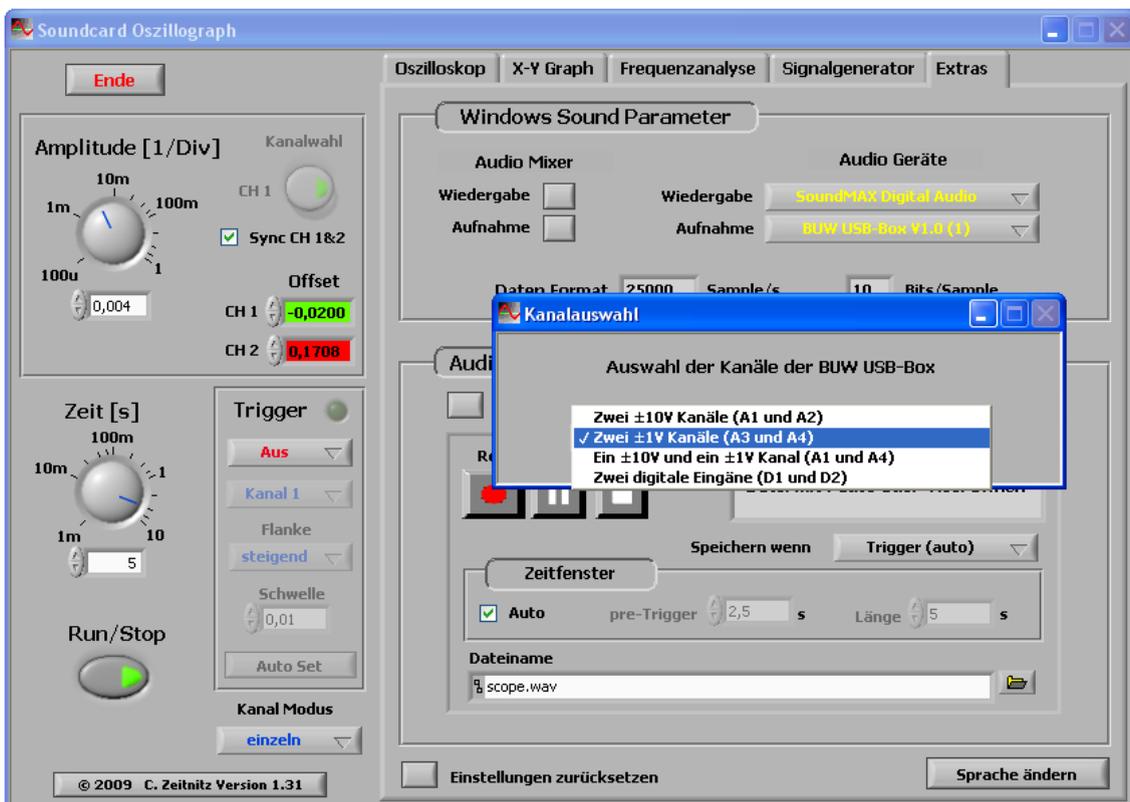
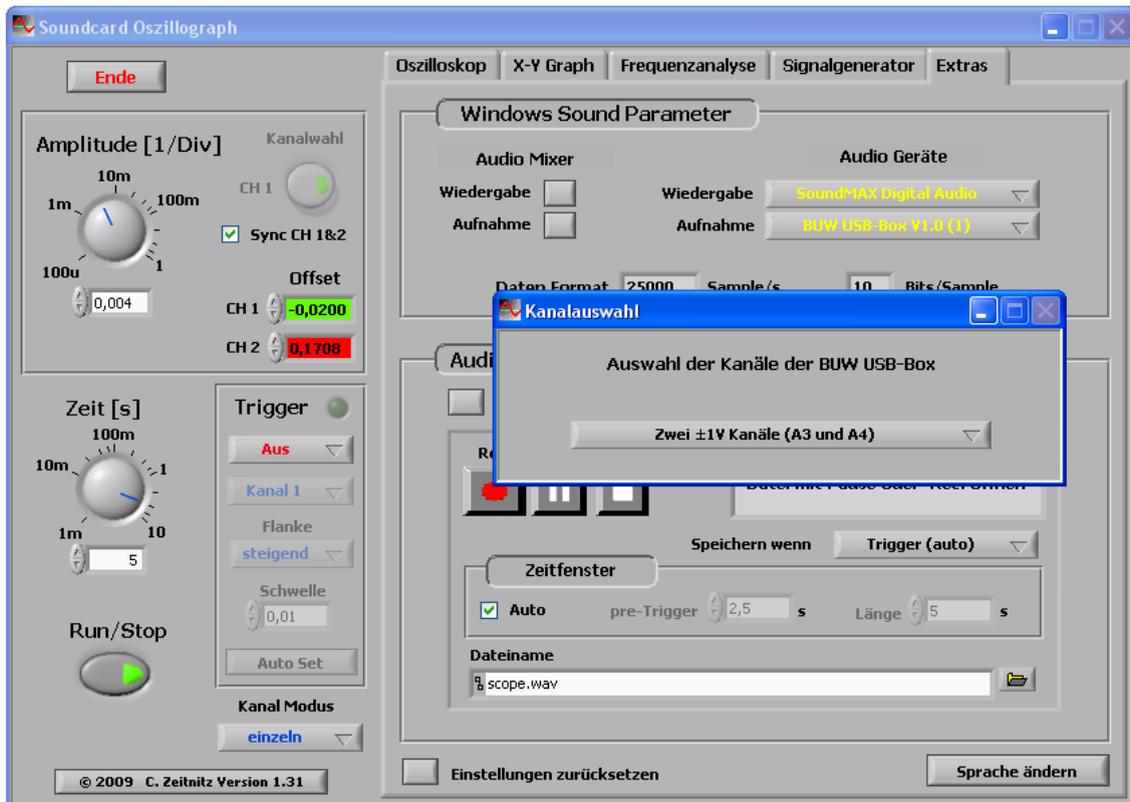


Abbildung 4: Auswählen der verwendeten Aufnahmekanäle der Box im Scope, z.B. zwei 1 V-Analog-Kanäle A3 und A4

2 Die Fallröhre – Induzierte Spannung in Spulen

2.1 Benötigte Geräte

Fallröhre mit 3 Spulen	Leybold-Kuzschlusstecker
4 Bananenstecker-Kabel	Leybold-1 k Ω -Widerstand
USB-Box	Leybold-100 k Ω /-1 M Ω -Widerstand
Operationsverstärker-Box	Leybold-0,1 μ F-Steckkapazität

2.2 Der Versuch

Mit der Fallröhre kann über magnetische Induktion in hintereinandergeschalteten Leiter-schleifen die Flugzeit eines Magneten gemessen und hieraus beispielsweise die Fallbeschleunigung der Erde bestimmt werden. Die gemessenen Signale können hierbei am PC ausgewertet werden. Der hierzu verwendete Aufbau ist in Abb. 5 schematisch dargestellt.

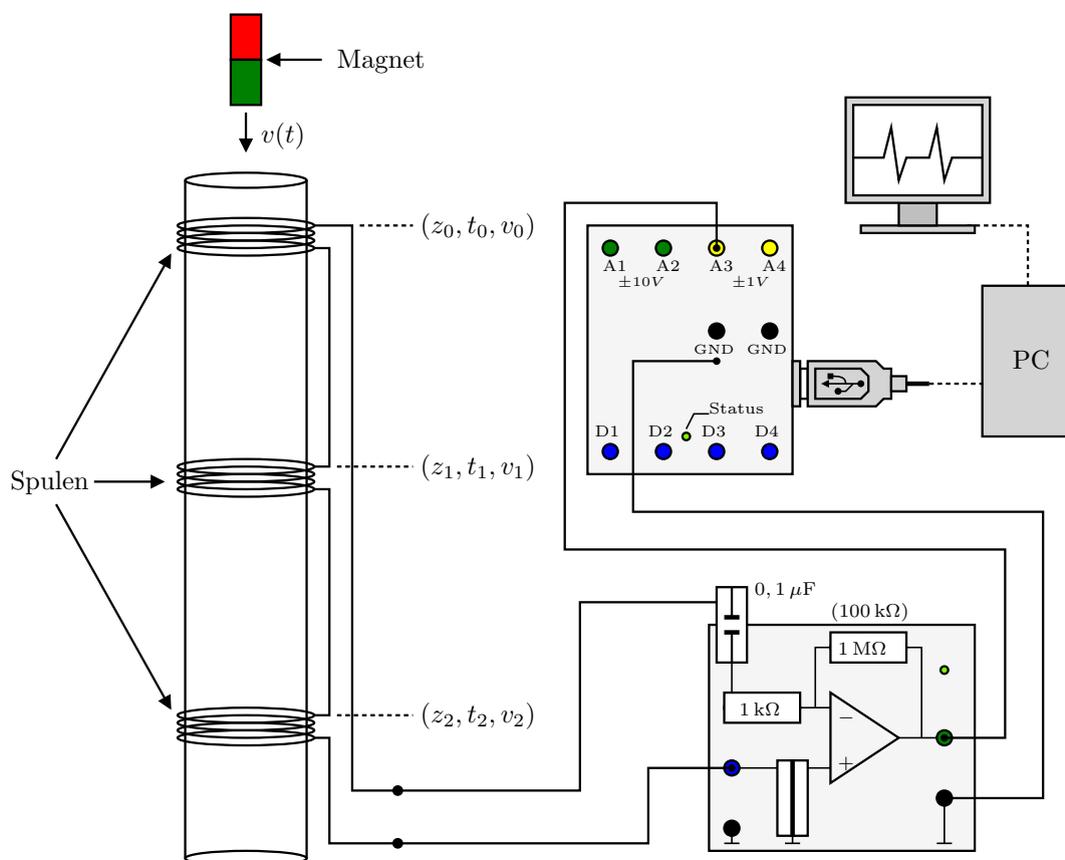


Abbildung 5: Schematischer Aufbau der Fallröhre

Der 0,1 μ F-Kondensator sollte unmittelbar an der Operationsverstärker-Box angebracht und die Verkabelung allgemein möglichst kurz gehalten werden, um Störsignale gering zu halten (Vgl. Abb. 8 bis 10).

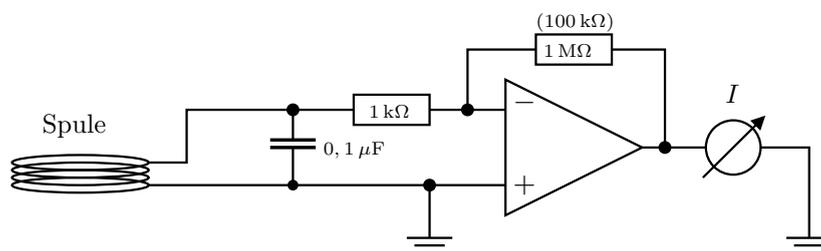


Abbildung 6: Schaltplan zum Aufbau

Die in einer Leiterschleife induzierte Spannung U_{ind} ist proportional zur Windungszahl n der Spule und zur zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses Φ :

$$U_{\text{ind}} = -n \frac{d\Phi}{dt} = -n\dot{\Phi} \quad (2.1)$$

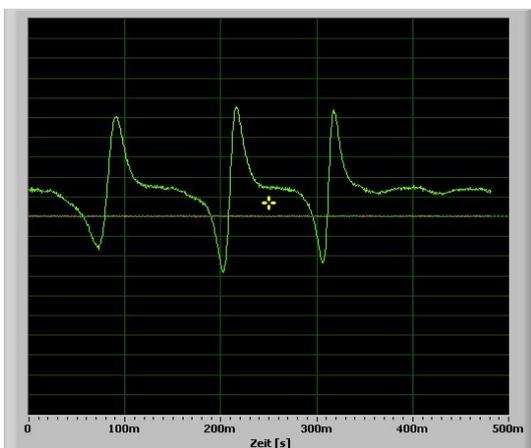
Je nach Anzahl der verwendeten Spulenwindungen und Stärke des Magneten – *es kann auch ein nur schwach magnetisierter Eisenstab verwendet werden* – muss das induzierte Spannungssignal verstärkt werden (s. Abb. 5, 6 und 9). Die in der Fortbildung zur Verfügung stehenden Prototyp-Spulen haben eine Wicklungszahl von $n = 100$ bei einer Drahtstärke von 0,1 mm

2.3 Verwendung der Fallröhre

Der Versuch wird wie in Abb. 5, bzw. Abb. 7 dargestellt aufgebaut (Verstärker anschalten – grüne LED leuchtet), das LabView-Programm *Oszilloskop* gestartet und der verwendete Kanal der *USB-Box* eingestellt (s. S.1 ff.). Die Spulen können jeweils auf unterschiedlichen, frei gewählten Höhen justiert werden (Vgl. Abb. 13 und 14).

Beim Aufstellen/Anbringen der Fallröhre ist zu beachten, dass diese senkrecht steht, damit der Stabmagnet beim Fallenlassen nicht in der Röhre aneckt (Abb. 7)!

Ist die USB-Box aktiviert und das Programm gestartet, wird ein Stabmagnet (*oder ein magnetisierter Gegenstand*) senkrecht von oben durch die Röhre fallengelassen (Abb. 11). Die durch den Magneten in den Spulen erzeugten induzierten Spannungspulse können nun am Oszillographen beobachtet und deren zeitliche Abstände zueinander vermessen werden.



Die Induktionsspulen sollten hierbei so verkabelt werden, dass sie in gleicher Richtung gepolt sind. Durchläuft ein Magnet die Fallröhre (mit N-S-Ausrichtung parallel zur Fallrichtung, ohne sich im Flug zu drehen), so sollten die in den einzelnen Spulen induzierten Strompulse, abgesehen von unterschiedlichen Amplituden, jeweils die gleiche Form besitzen (vgl. die drei Impulse in der linken Abbildung).

Um die Pulse sichtbar zu machen, können an der USB-Box unterschiedliche Steckwiderstände ($100\text{ k}\Omega$, $1\text{ M}\Omega$; Abb. 9) gewählt und am *Scope* Signalstärke und Zeitskala angepasst werden,

2 Die Fallröhre – Induzierte Spannung in Spulen

um eine gut lesbare Signaldarstellung zu erhalten. (Bei einem Verstärkungsfaktor von 10^3 verwenden Sie beispielsweise die in Abb. 17 gewählten Einstellungen 0,2 für die Amplitude und 600 ms für die Länge des Zeitfensters.)

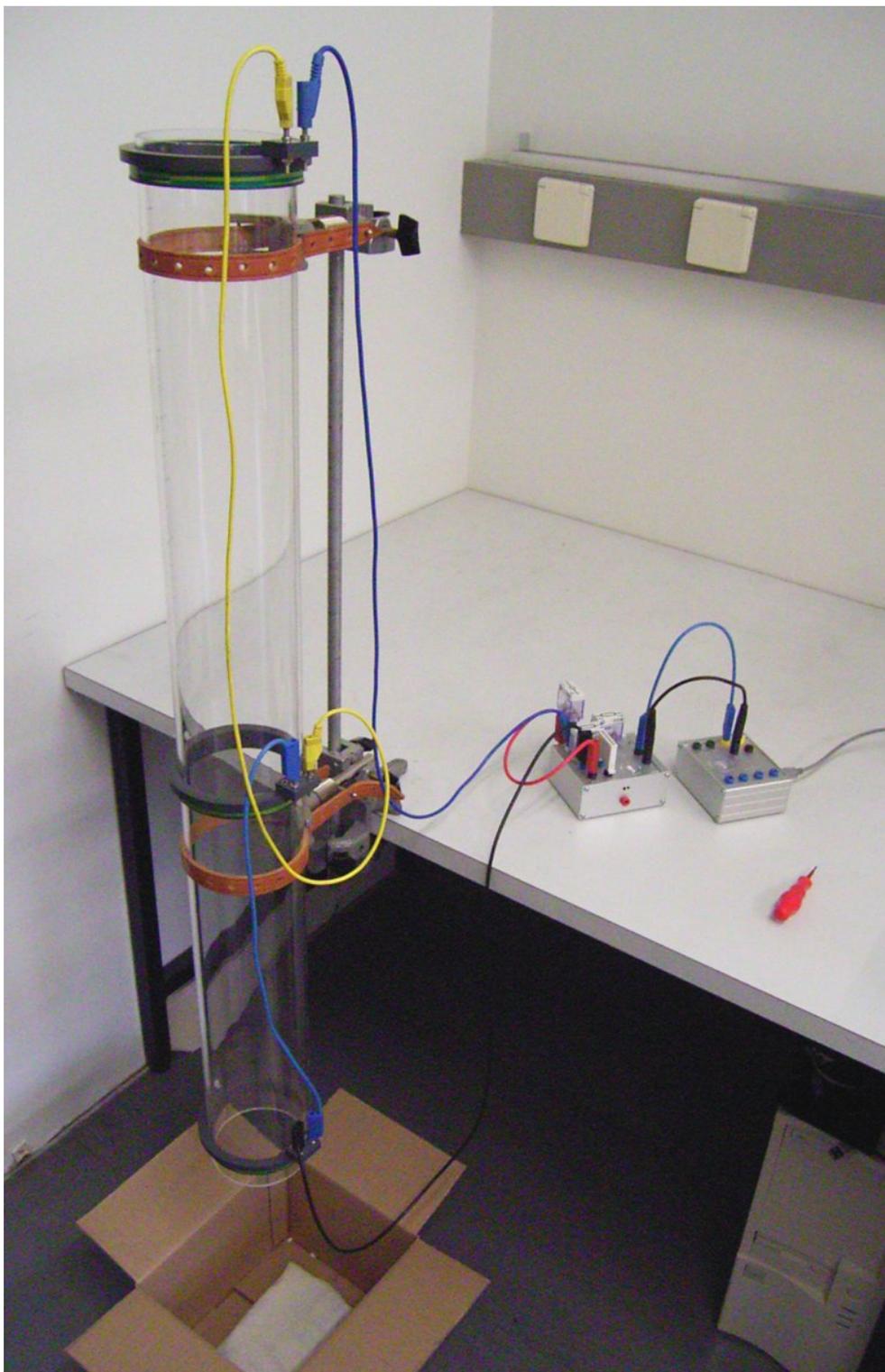


Abbildung 7: Fallrohre – Beispielaufbau

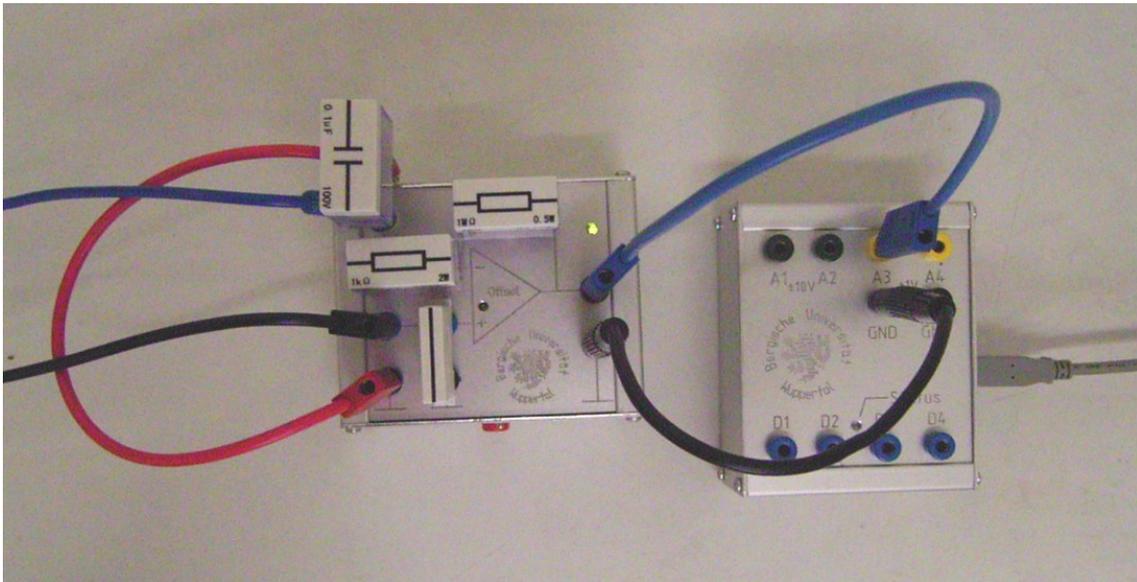


Abbildung 8: Fallrohre – Anschlüsse an Operationsverstärker und USB-Box

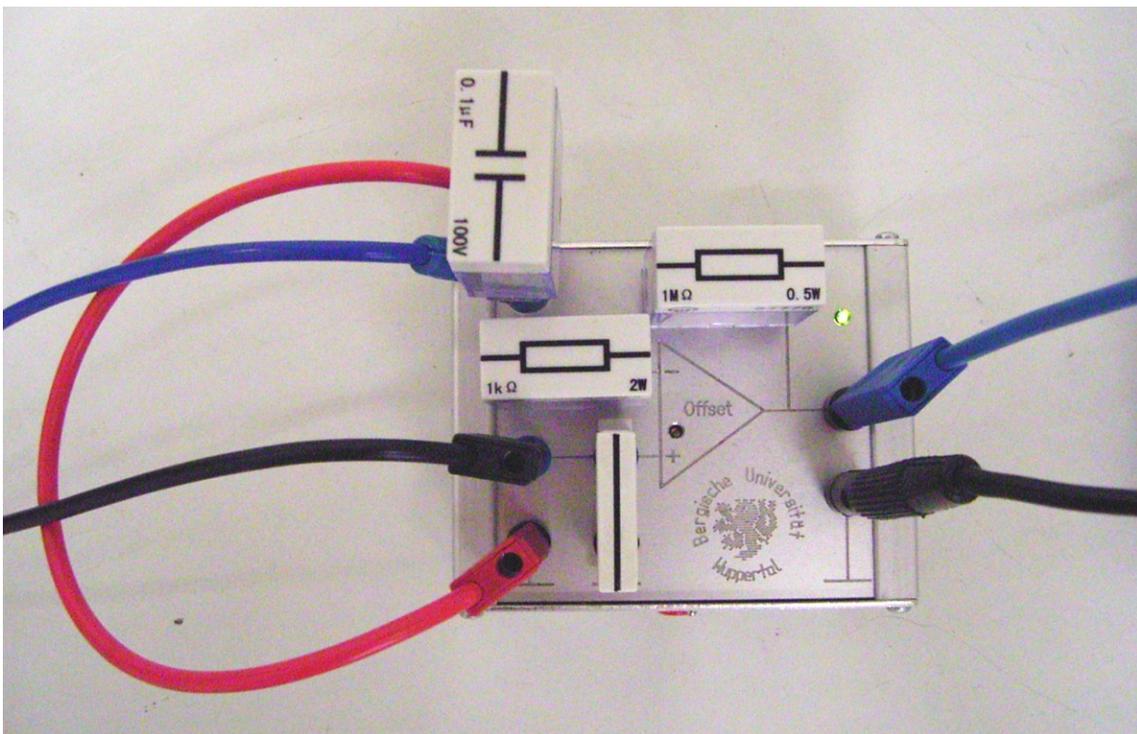


Abbildung 9: Fallrohre – Anschlüsse am Operationsverstärker

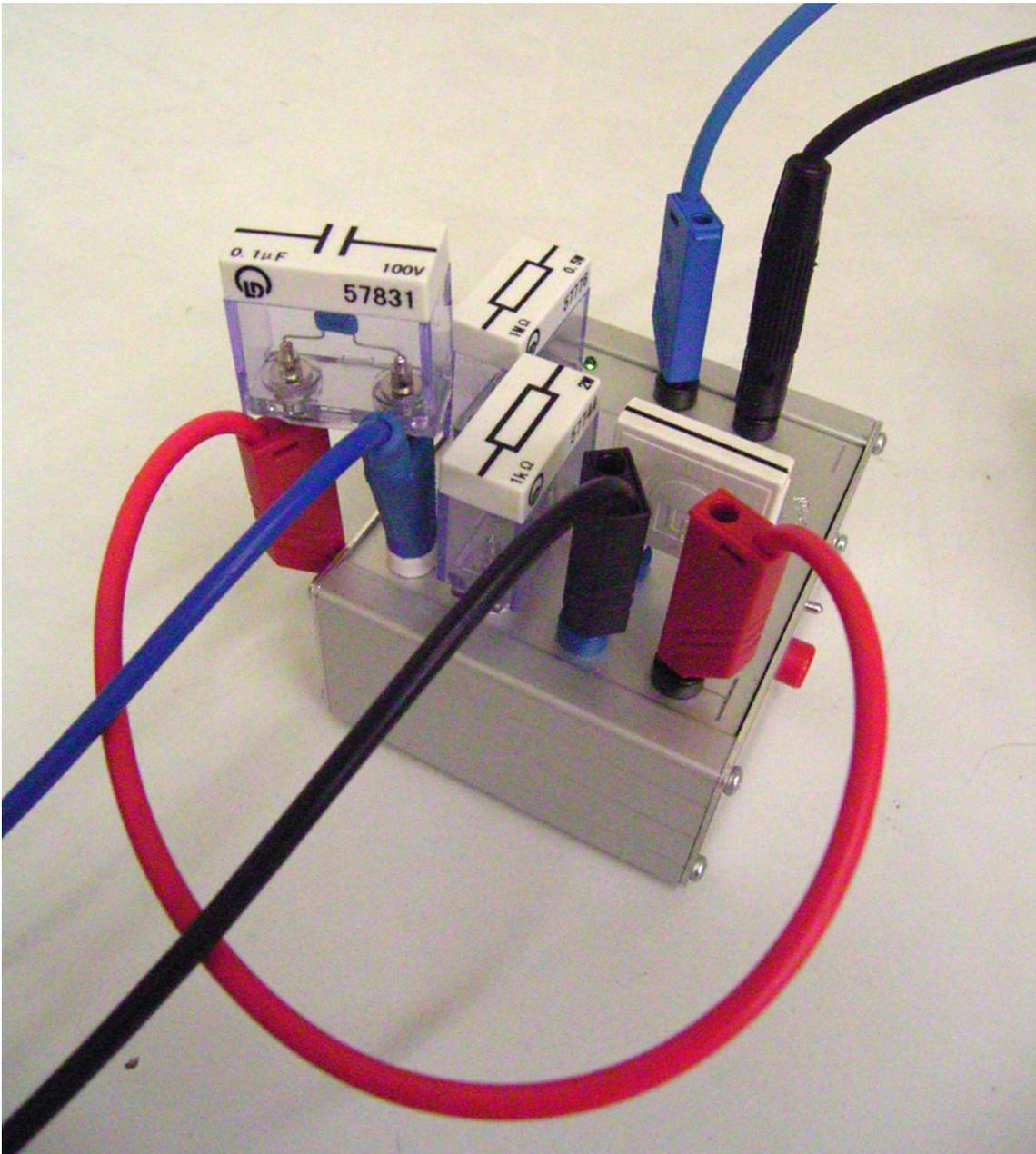


Abbildung 10: *Fallrohre – Anschlüsse am Operationsverstärker*

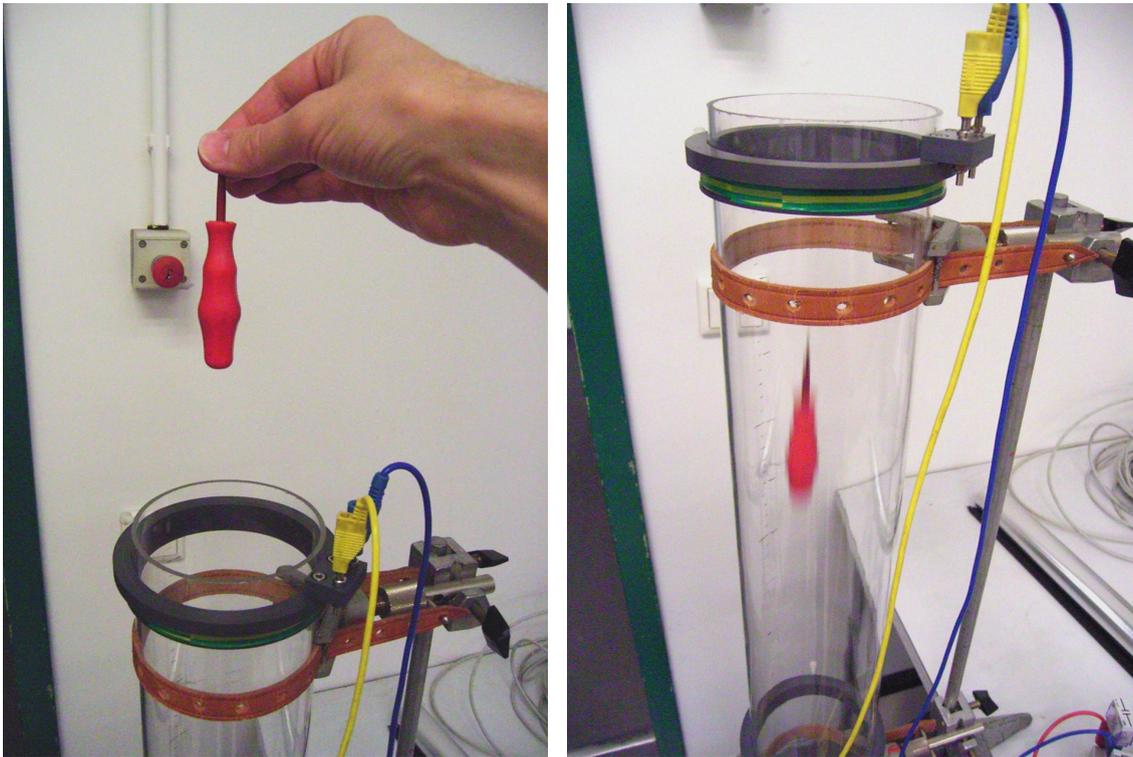


Abbildung 11: Fallröhre – Ein magnetisierter Schraubendreher wird durch die Röhre fallengelassen.

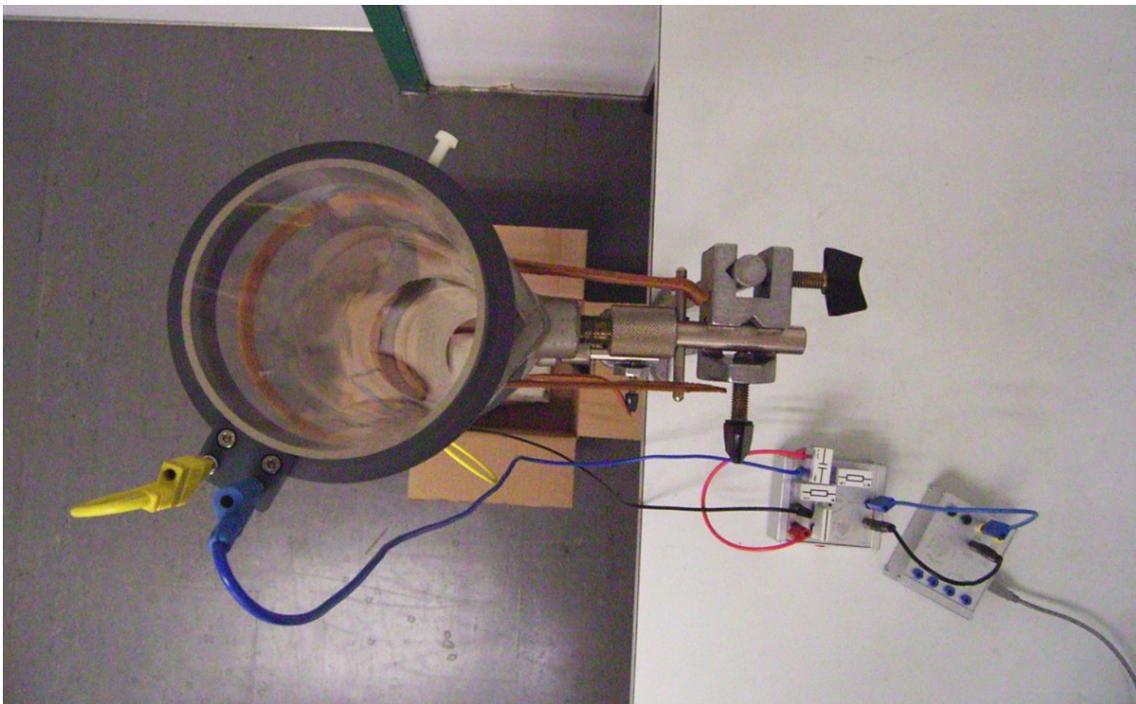


Abbildung 12: Fallröhre – Betrachtung von oben

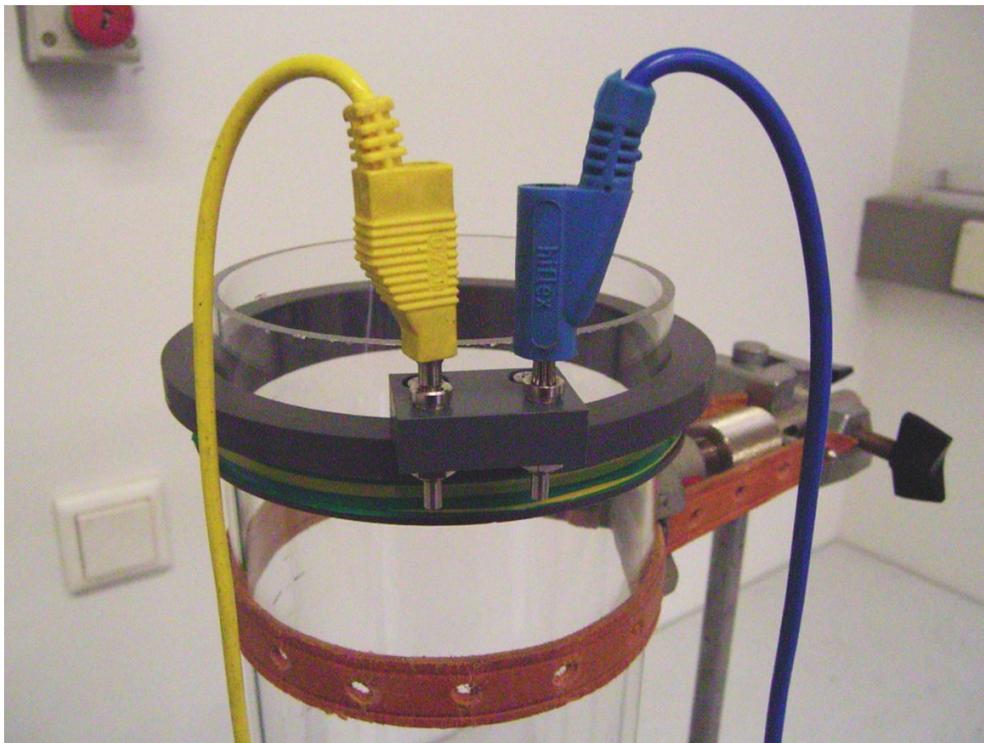


Abbildung 13: Fallrohre – oberer Induktionsschleifenring

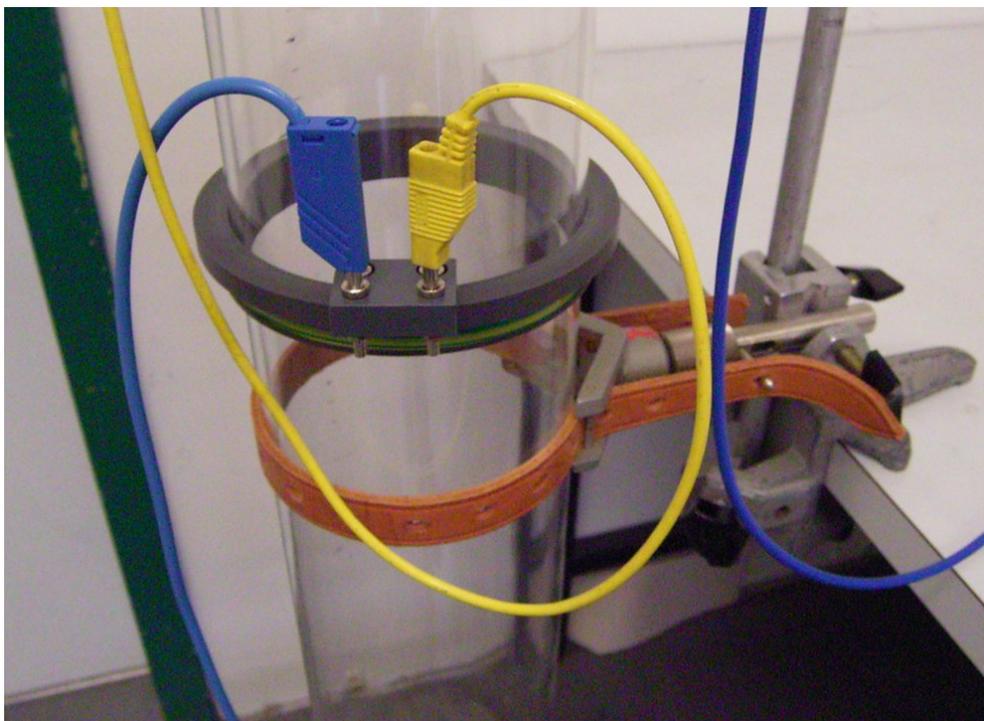


Abbildung 14: Fallrohre – mittlerer Induktionsschleifenring

Es empfiehlt sich, nach Auswahl des Messkanals zunächst zur besseren Übersichtlichkeit den zweiten nicht genutzten Kanal auszublenden (Abb. 16, (4)), wodurch die Offset-Option für diesen Kanal (3) ausgraut.

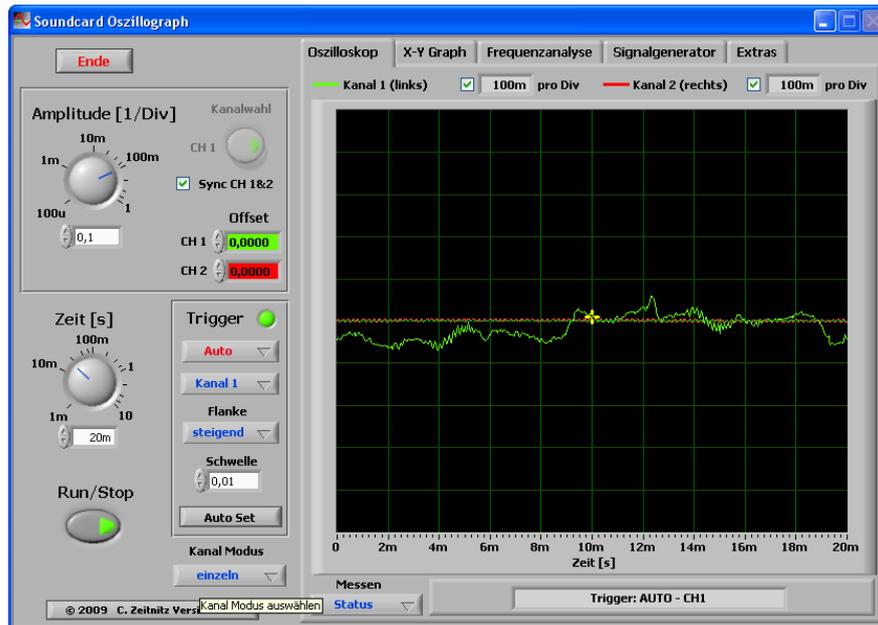


Abbildung 15: Getriggertes Rauschsignal von einer angeschlossenen Fallröhre (grüne Linie im Darstellungsfenster des Scopes)

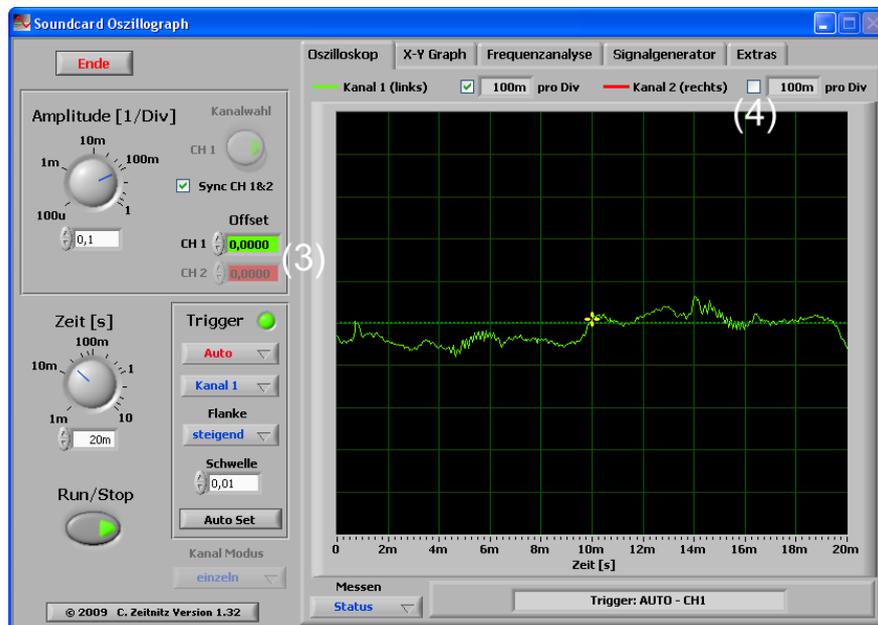


Abbildung 16: Zur besseren Übersichtlichkeit kann das zweite über Kanal 2 eingespeiste tote Signal (rot) ausgeblendet werden (4). Die Offset-Option für diesen Kanal (3) erscheint daraufhin ausgegraut.

Als nächstes sollte der Darstellungsbereich angepasst werden, indem die Signalamplitude und das Zeitfenster über die entsprechenden Drehknöpfe auf passende Werte eingestellt werden (Abb. 17, (1) und (2)). Bei Verwendung einer Vorverstärkung um den Faktor 10^3 , sind beispielsweise 0,2 (Amplitude) und 600 ms (Zeit) für eine übersichtliche Darstellung der Induktionspulse sinnvoll.

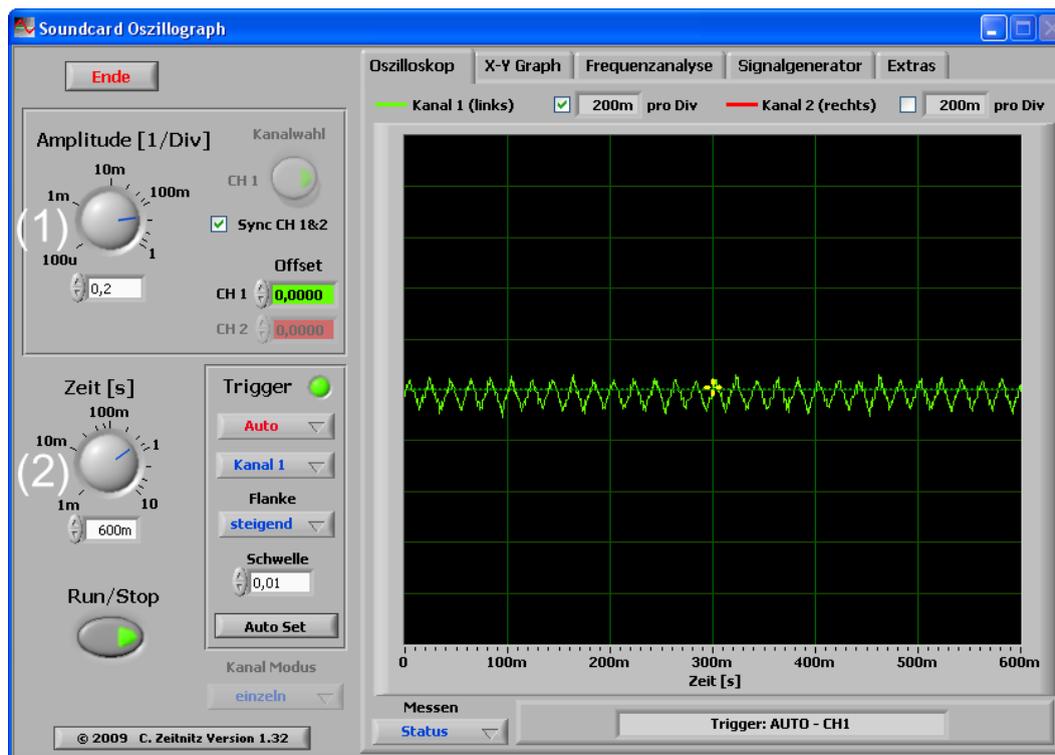


Abbildung 17: Der im Fenster dargestellte Amplituden- und Zeitbereich können über die Drehknöpfe (1) und (2) oder direkt in den jeweiligen Eingabefeldern unterhalb der Knöpfe eingestellt werden.

Die im Rahmen der Grundeinstellung *automatische* Triggerung kann vorübergehend ausgeschaltet werden (Abb. 18, (5)), um ein durchgehendes Signal anzeigen zu lassen.

Über die *Offset*-Option (Abb. 19, (3)) kann ein evtl. Signal-Offset ausgeglichen werden, um somit die horizontale Signallinie sinnvollerweise auf die Amplituden-Nulllinie in der Mitte des Anzeigefensters zu legen. Als Hilfestellung werden bei Anklicken eines der *Offset*-Eingabefelder kurzfristig Hilfslinien für beide Kanäle (grün und rot) eingeblendet.

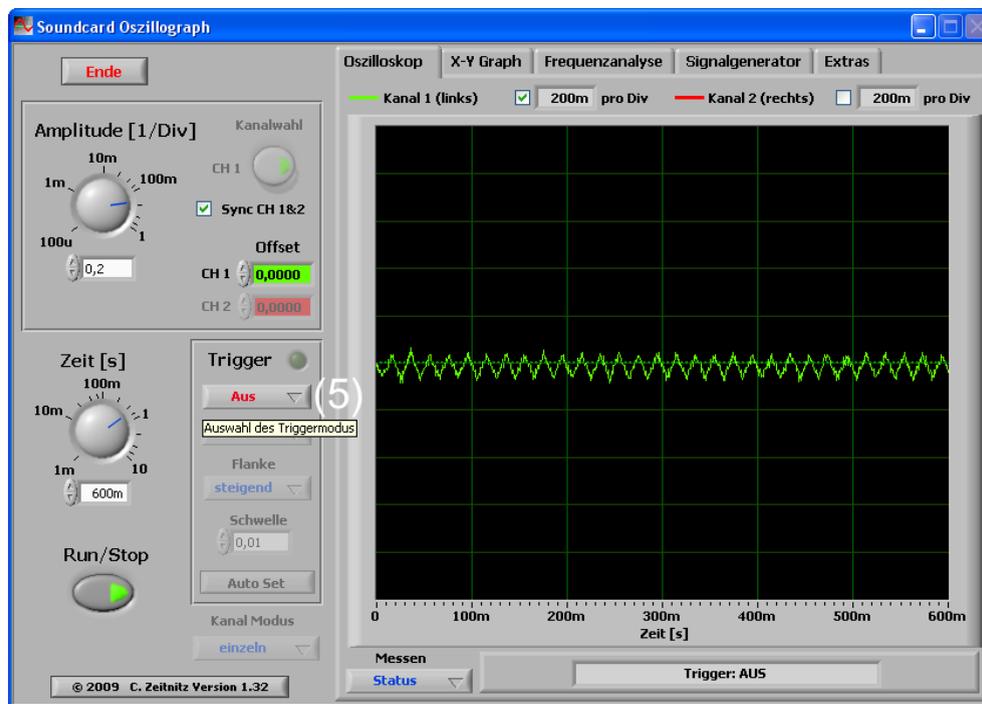


Abbildung 18: Um sich das ununterbrochene Signal durchlaufend anschauen zu können (hier nur Untergrundrauschen), kann der Trigger über den Knopf (5) deaktiviert werden.

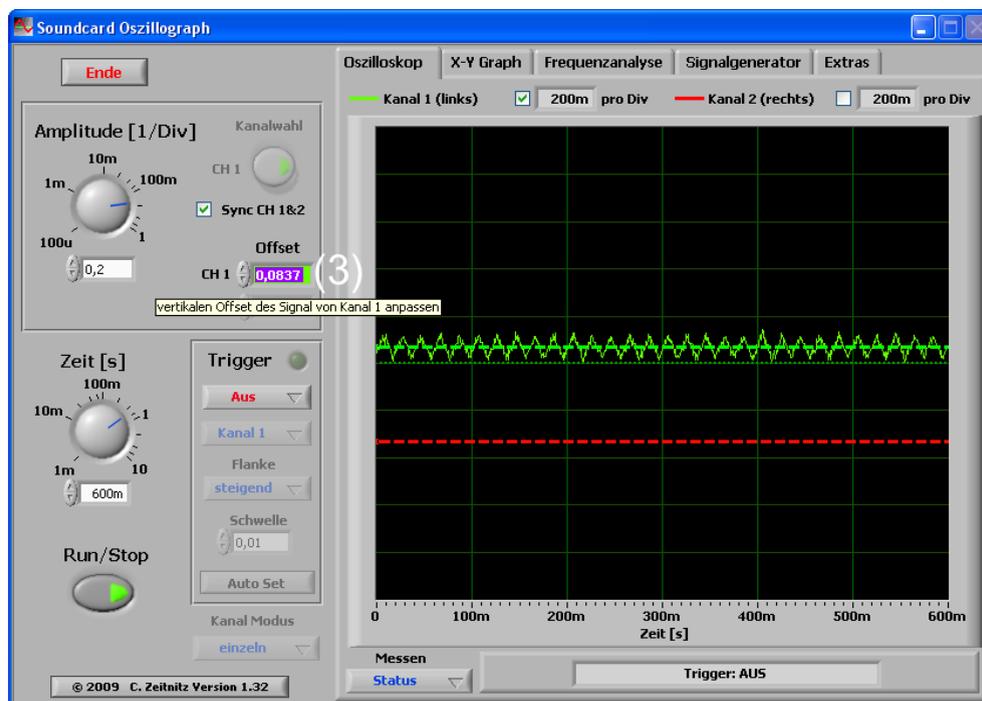


Abbildung 19: Ein evtl. Signal-Offset kann über die gleichnamigen Eingabefenster (3) jeweils für beide Kanäle eingestellt werden.

Um nun einen Messdurchlauf aufzunehmen, wird der Trigger (Abb. 20, (5)) auf *Single-Shot* eingestellt. Das im Darstellungsfenster erscheinende Trigger-Kreuz (6) kann mit der Maus an eine beliebige Stelle gesetzt werden. Die *Triggerschwelle* (Amplitudenwert, ab dem ein Signal aufgenommen wird) kann auch exakt über (7) eingestellt werden.

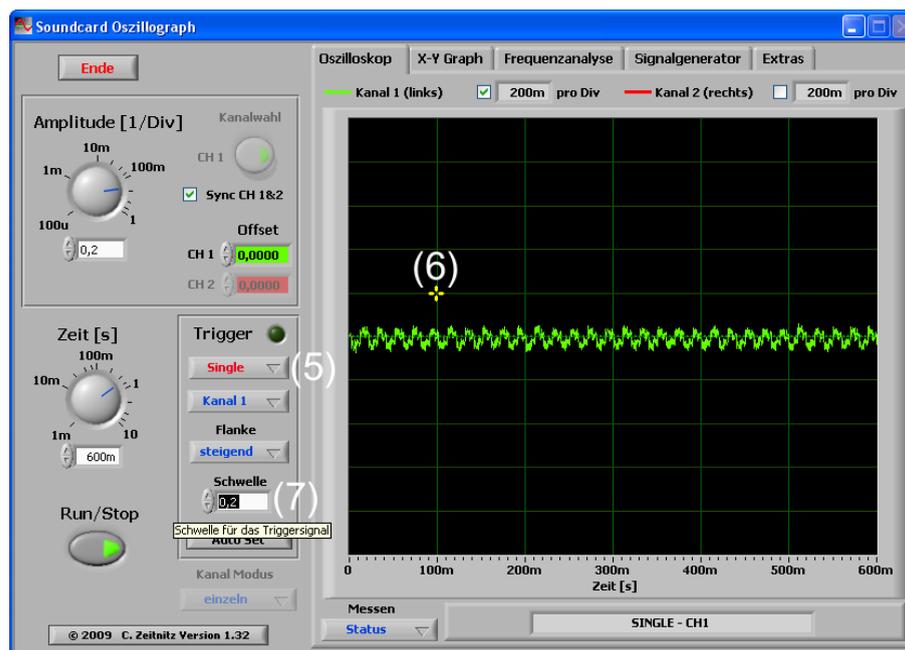


Abbildung 20: Ist der *Single Shot-Trigger* eingestellt (5), so kann in (7) die (vertikale) *Triggerschwelle* eingestellt werden. Das *Triggerkreuz* (6) kann auch mit der Maus an eine beliebige Stelle im Anzeigefenster gezogen werden.

Beim Fallenlassen eines Stabmagneten, magnetisierten Eisenstückes, magnetisierbaren Schraubendrehers oder dergleichen, beginnt die Datennahme im *Single-Shot-Modus*, sobald die Signalstärke die eingestellte *Triggerschwelle* über-, bzw. unterschreitet und stoppt automatisch nach einem Lauf (*Run*). Das *Triggerkreuz* (Abb. 21, (6)) sollte weit genug links im Darstellungsfenster positioniert werden, damit alle drei Spulensignale (10) ins Fenster passen. In der Abbildung ist ein um den Faktor 10^3 verstärktes Signal dargestellt. Aufgrund der hohen Verstärkung gehen die Spannungsspitzen bereits in den Sättigungsbereich über.

Zur Bestimmung der zeitlichen Signalabstände eignen sich besonders gut die drei Umkehrbereiche der Pulse (Schnittpunkte der steilen nahezu geraden Kurvenbereiche mit der Nulllinie), an denen sich das verwendete magnetische Fallobjekt genau auf Höhe der signalerzeugenden Spulen befindet. Um diese Schnittpunkte einzeln genau ausmessen zu können, wird unter „Messen“ die Einstellung „Cursor“ ausgewählt (Abb. 21 und 22, (8)), woraufhin die *Zoom-Funktion* (11) erscheint (Abb. 23). Wird diese eingeschaltet (✓), so wird die danebenstehende Schiebeleiste (Abb. 24, (12)) aktiviert. Zusätzlich erscheint eine vertikale mit der Maus nach links und rechts verschiebbare *Cursorlinie* (9) im Anzeigefenster. Mit dem Schieberegler lässt sich nun der Bereich um die *Cursorlinie* herum vergrößern. Die Messwerte der aufgenommenen Kurve an der Schnittstelle mit der *Cursorlinie* werden zudem als Zahlenwerte im Darstellungsfenster grün angezeigt (13). Die *Cursorposition* wird in orange ausgegeben.

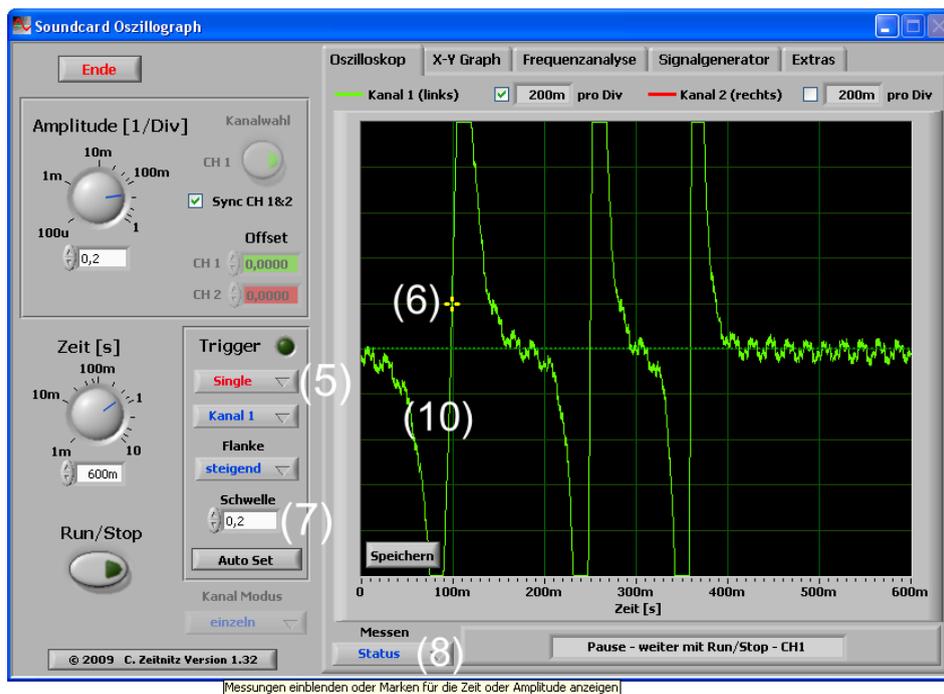


Abbildung 21: Nach einem Single Shot (5) erfolgt die Datenaufnahme, sobald die Signalstärke die eingestellte Triggerschwelle (7) über-, bzw. unterschreitet und stoppt automatisch nach einem Lauf (Run). Ist das Triggerkreuz (6) günstig gesetzt, werden alle drei Spulensignale (10) im Anzeigefenster dargestellt.

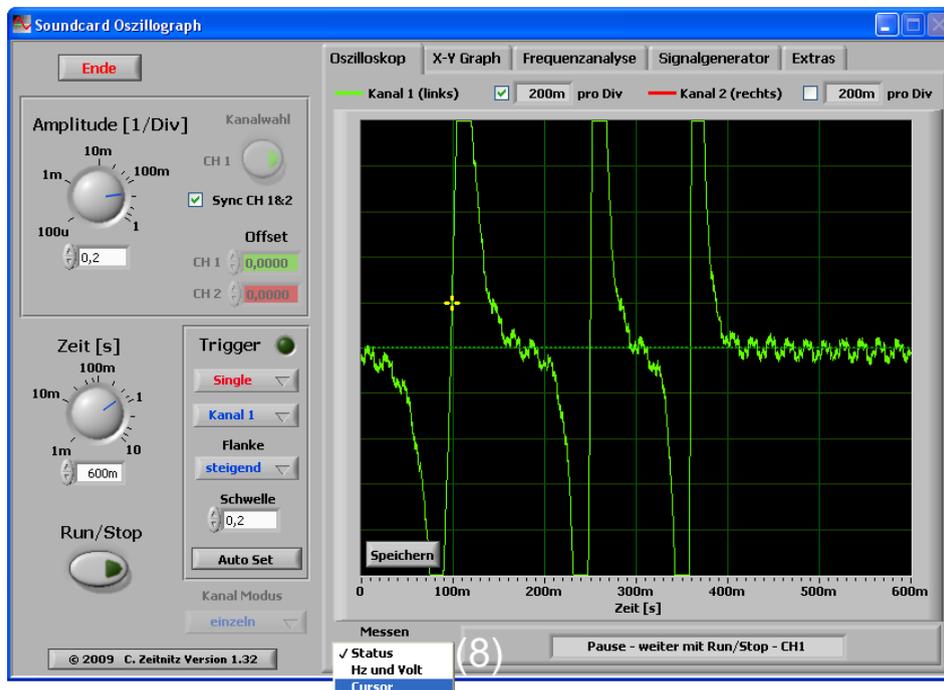


Abbildung 22: Zur genaueren Analyse der Datenkurve wird unter „Messen“ die Einstellung „Cursor“ (8) ausgewählt.

In Abb. 25 ist ein Spulensignal vergrößert dargestellt. Zur genauen Bestimmung des Umkehrpunktes im Induktionssignal wird nun die Cursorlinie (9), wie in der Abb. dargestellt, so gut wie möglich mit der Maus an die Schnittposition von Messkurve (10) und Nulllinie geschoben und erneut eine Ausschnittsvergrößerung vorgenommen. Abb.

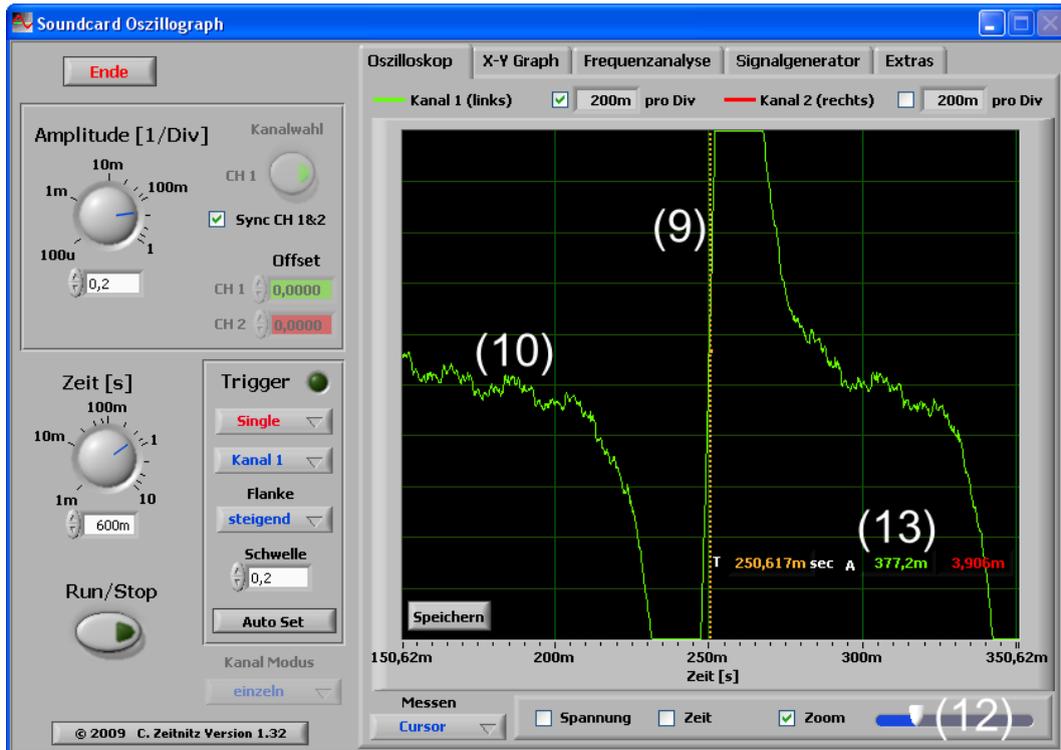


Abbildung 25: Vergrößerung eines Messpeaks mit dem Schieberegler (12); Cursorlinie (9), Messkurve (10), Schnittstellenwerte (13)

26 zeigt eine maximale Ausschnittsvergrößerung um den Nullpunkt herum. Schiebt man die Cursorlinie an diese Position, so lässt sich der Durchgangzeitpunkt des Magneten in der Spule mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 50 \mu\text{s}$ ablesen.

Dieser Zeitwert sollte für die spätere Auswertung (s. S.21) notiert werden! Verfährt man auf diese Weise auch mit den anderen beiden Signalen, lassen sich die Zeitdifferenzen t_1 zwischen Signal 1 und 2, sowie t_2 zwischen Signal 1 und 3 entsprechend genau bestimmen.

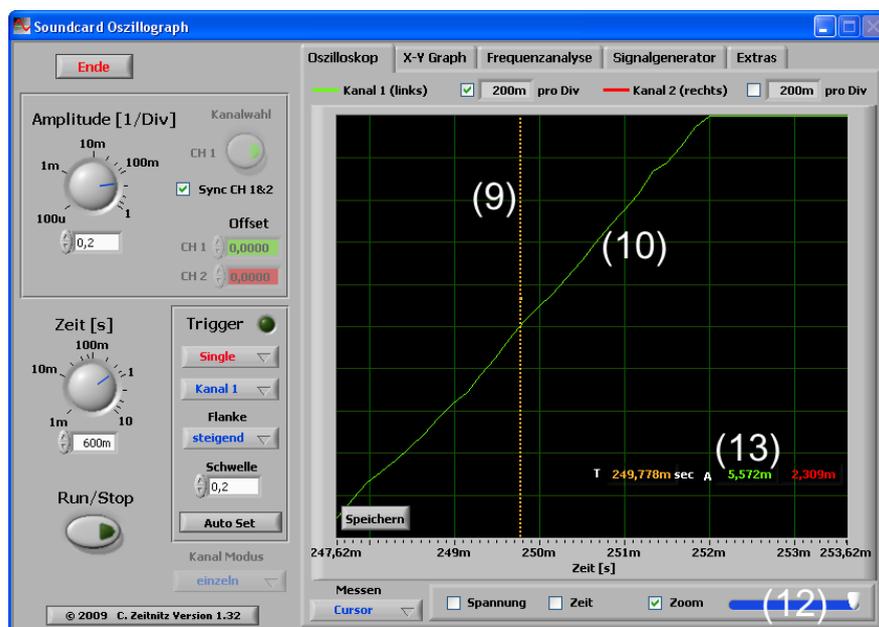


Abbildung 26: Maximale Vergrößerung eines Messpeaks mit dem Schieberegler (12); an der Schnittstelle von Cursorlinie (9) und Messkurve (10) bei 249,778 ms liegt ein Amplitudenwert von 5,579 mV vor (13).

Zur Bearbeitung mit externen Fit-Programmen (*Excel, Origin, GnuPlot, etc.*) lassen sich die Messwerte zusätzlich über die nach jedem gestoppten Messlauf erscheinende Schaltfläche *Speichern* in mehreren Formaten sichern (s. Abb. 27 und Tab. 28).

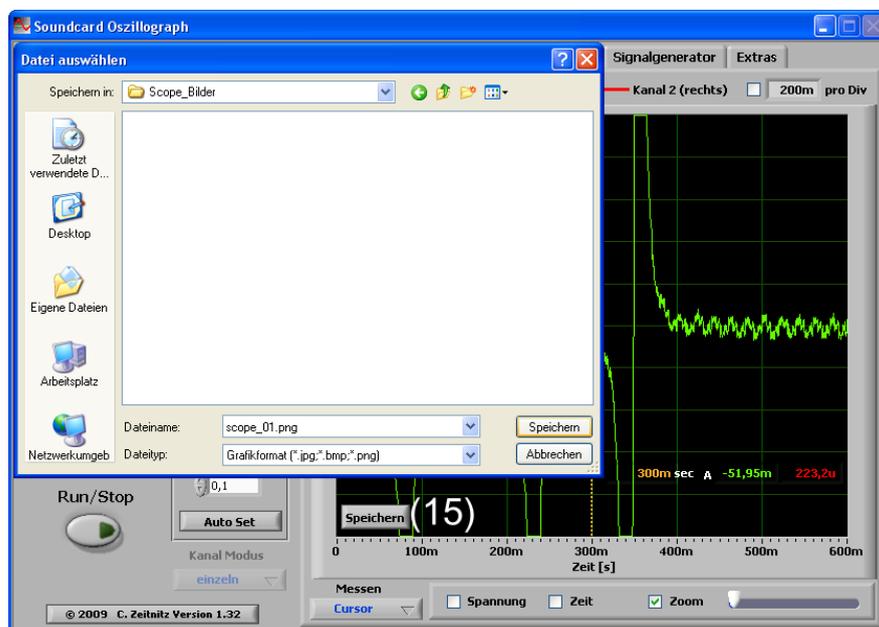


Abbildung 27: Nach Beendigung eines Messlaufs (*Run*) erscheint die Option „Speichern“ links unten im Darstellungsfenster. Hierüber lässt sich die Messung in Bildformat und als *.csv*-Datei speichern.

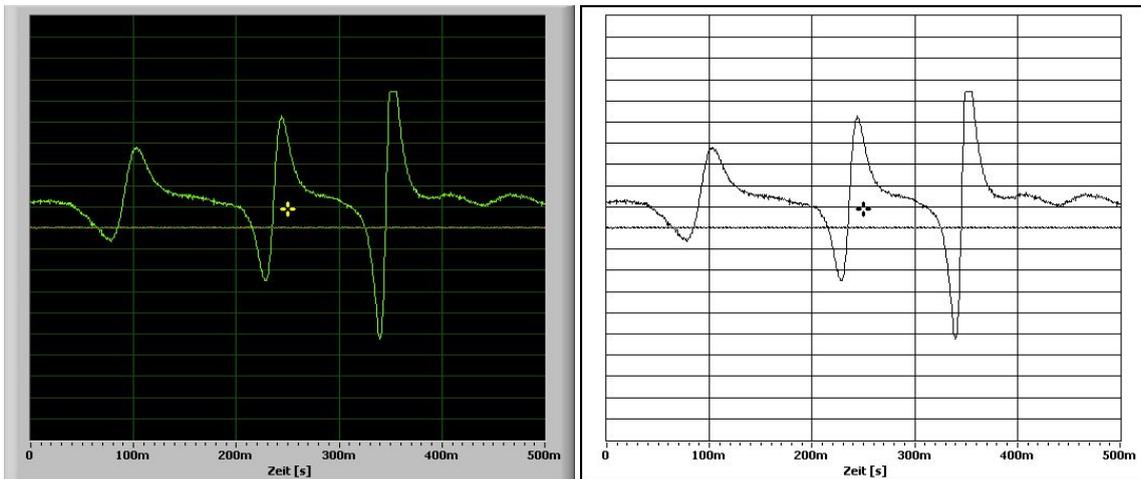


Abbildung 28: Gespeicherte Kurvenbilder: Beim Speichern der Messung werden ein direktes Display-Abbild und ein schwarz-weiß-jpg-Image angefertigt.

Tabelle 1: Format der zusätzlich zu den beiden Bilddateien beim Speichern angefertigten .csv-Datei (Beispielwerte)

	Zeit:	Wert (Signal 1)	Wert (Signal 2)	
1	0	0,123342	0,003906	
2	0,00068	0,117483	0,003906	
3	0,00136	0,119435	0,003906	
4	0,00204	0,123342	-0,001953	
5	0,00272	0,115529	-0,001953	
6	0,0034	0,127248	0,001953	
7	0,00408	0,121389	0,003906	
8	0,00476	0,121389	-0,003906	
9	0,00544	0,121389	-0,001953	
10	0,00612	0,123342	0	
11	0,0068	0,131153	0,003906	
⋮	⋮	⋮	⋮	

2.3.1 Auswertung – Bestimmung der terrestrischen Fallbeschleunigung

Die Fallstrecke $z(t)$ eines Massekörpers berechnet sich allgemein an der Erdoberfläche wie folgt aus der Fallzeit t des Körpers zu:

$$z(t) = z_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (2.2)$$

Wendet man diese Formel auf die beide Fallstrecken ($z_1 - z_0$) und ($z_2 - z_0$) an, so erhält man ein Gleichungssystem, durch das sich v_0 eliminieren lässt:

$$\left. \begin{aligned} z_1(t_1) = v_0 t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 &\Leftrightarrow \frac{z_1}{t_1} = v_0 + \frac{1}{2} g t_1 \\ z_2(t_2) = v_0 t_2 + \frac{1}{2} g t_2^2 &\Leftrightarrow \frac{z_2}{t_2} = v_0 + \frac{1}{2} g t_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow v_0 = \frac{z_1}{t_1} - \frac{1}{2} g t_1 = \frac{z_2}{t_2} - \frac{1}{2} g t_2 \quad (2.4)$$

Durch weitere Umformung erhält man die **Fallbeschleunigung** g :

$$\begin{aligned} \Rightarrow \left(\frac{t_2 - t_1}{2} \right) g &= \frac{z_2}{t_2} - \frac{z_1}{t_1} \\ \Leftrightarrow g &= \frac{2 \left(\frac{z_2}{t_2} - \frac{z_1}{t_1} \right)}{t_2 - t_1} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Die Differenz der beiden Gln. (2.3) kann ebenso nach der **Anfangsgeschwindigkeit** v_0 aufgelöst werden:

$$\begin{aligned} \Rightarrow g &= 2 \left(\frac{z_2}{t_2^2} - \frac{v_0}{t_2} \right) = 2 \left(\frac{z_1}{t_1^2} - \frac{v_0}{t_1} \right) \\ \Leftrightarrow \frac{z_2}{t_2^2} - \frac{z_1}{t_1^2} &= \frac{v_0}{t_2} - \frac{v_0}{t_1} = \frac{v_0(t_1 - t_2)}{t_1 t_2} \\ \Leftrightarrow v_0 &= \frac{\left(\frac{z_2}{t_2^2} - \frac{z_1}{t_1^2} \right) t_1 t_2}{t_1 - t_2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.3.2 Justage der Spulenringe auf der Kunststoffröhre

Als erfolgreichste Methode, die Spulenringe mit einem wohldefinierten Abstand d_i (s. Abb. 29) zueinander auf der Fallröhre zu justieren, hat sich das Ausrichten mittels Eichmaßen bewährt. Hierfür stehen bei der Fortbildung drei 46 cm-lange Eisenstäbe zur Verfügung.

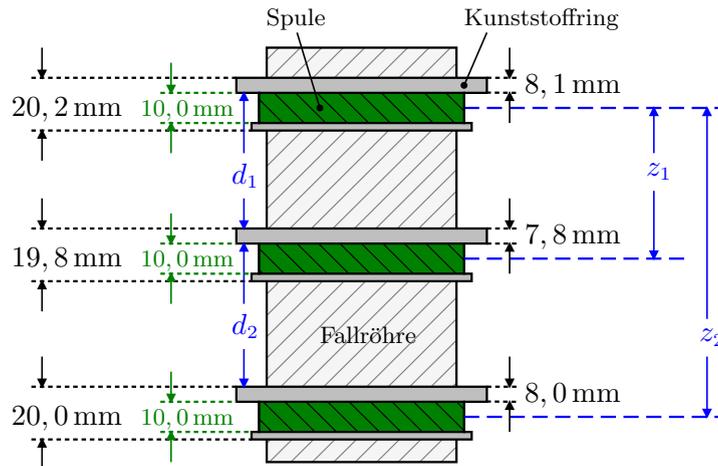


Abbildung 29: Schema der Fallröhre mit den Spulenringabmessungen des Prototyps.

Mit ihnen lassen sich die Ringe beispielsweise auf den Abständen $d_1 = d_2 = 46$ cm fixieren. Die Fallstrecken, für welche jeweils die Abstände z_i zwischen den Spulenmitten entscheidend sind, lassen sich dann über simple geometrische Zusammenhänge berechnen. Mit Hilfe der gemessenen Fallzeiten ergeben sich dann berechnete g -Werte über Gl. (2.5).

2.3.3 Messungenauigkeiten und deren Auswirkungen

Trotz des simpel gestrickten Messprinzips erweist sich das Erzielen exakter Fallbeschleunigungswerte mit dieser Art des Aufbaus als relativ schwierig. Die Gründe hierfür sind in den Ungenauigkeiten der Spulenjustage in Verbindung mit der relativ kurzen Röhrenlänge zu finden (für die Fortbildung steht lediglich eine 1 m-Acrylglas-Röhre zur Verfügung).

Während die Messzeiten mit Hilfe des Scopes bis auf ungefähr $50 \mu\text{s}$ genau bestimmt werden können, was einem Fehler von maximal $\pm 5\%$ ($\approx 0,05 \text{ m/s}^2$) entspricht, ist die Distanz zwischen den Induktionsspulen auf der Fallröhre nur mit viel Geschick auf schätzungsweise $\sim 1/3$ mm einstellbar. Dies entspricht bei äquidistanten Abständen von 46 cm zwischen den Spulenringen einer Ungenauigkeit von $\leq 0,04 \text{ m/s}^2$ ($\approx 4\%$). Bei einer Justageungenauigkeit von ± 1 mm liegt bereits eine Abweichung von $\leq 0,12 \text{ m/s}^2$ ($\approx 1,2\%$) für den g -Wert vor.

Eine hinreichend genaue Distanzierung der Induktionsspulen wird beispielsweise durch die unregelmäßige Form der Kunststoffröhre erschwert. Die Gefahr der Verkipfung der Ringe gegeneinander ist relativ groß und kann hierbei schon alleine eine Variation von mehreren Millimetern zur Folge haben. Dementsprechend kann auch das Ergebnis, je nachdem, auf welcher Seite der Magnet durch die Röhre fällt, stark variieren.

Damit die für die Fortbildung zur Verfügung stehenden Spulen an sich keine unnötigen Messungenauigkeiten verursachen, sind diese gleichmäßig über eine Breite von 1 cm gewickelt und sind – wie bereits erwähnt – jeweils mit einer Wicklungszahl von $n = 100$ bei einer Drahtstärke von 0,1 mm versehen.

Ein weiteres Problem stellt die Abbremsung der beim Fallexperiment verwendeten magnetischen Gegenstände aufgrund unterschiedlicher Form und Dichte und der dadurch unterschiedlich stark wirkenden Luftreibung dar. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, sollten möglichst schwere und schlanke Gegenstände verwendet werden.

Die Ausmaße des magnetischen Objekts spielen ebenfalls eine gewichtige Rolle für die Messgenauigkeit. Je länger ein Stabmagnet ist, desto größer können – je nach Fertigungsqualität – die Inhomogenitäten im erzeugten Magnetfeld sein. Je kürzer ein Stabmagnet ist, desto eher neigt er hingegen dazu, sich im freien Fall unkontrolliert zu drehen, was den gemessenen Durchfallzeitpunkt inmitten eines Spulenrings verschieben kann.

Optimal wären aus dieser Sicht lange schwere und schlanke Gegenstände, welche lediglich über einen kurzen magnetischen Bereich verfügen. (*Anbieten würden sich beispielsweise Schraubendreher mit einer kleinen magnetisierten Spitze und mit Kunststoff-/Holzgriff, oder kleine an der Spitze eines langen dünnen Kunststoff-/Holzstabes befindliche Neodym-Magnete.*)

3 Das Pendel

3.1 Benötigte Geräte

Pendel
4 Bananenstecker-Kabel
Lichtschranke
5 V – *Spannungsquelle*
USB-Box

3.2 Theorie zum Versuch

Das eigentlich *physikalische Pendel* wird hier näherungsweise als *mathematisches Pendel* betrachtet. Die entsprechende Bewegungsgleichung für die Pendelmasse m lautet dann:

$$ma = F_g \sin(\varphi) \quad (3.1)$$

$$\Rightarrow ml\ddot{\varphi} = -mg \sin(\varphi) \quad (3.2)$$

$$\Rightarrow 0 \approx \ddot{\varphi} + \frac{g}{l}\varphi \quad \left| \quad \text{für kleine Winkel} \quad (3.3) \right.$$

Aus dieser Differenzialgleichung lassen sich Winkelgeschwindigkeit ω , Periodendauer T und Fallbeschleunigung g bestimmen:

$$\Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad \left| \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.4) \right.$$

$$\Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3.5)$$

$$\Rightarrow g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \quad (3.6)$$

Die maximale Pendelgeschwindigkeit berechnet sich über die Dunkelzeit t_{dunkel} der Lichtschranke beim Pendeldurchgang für eine Pendeldicke von d zu:

$$\Rightarrow v = \frac{s}{t} = \frac{d}{t_{\text{dunkel}}} \quad (3.7)$$

Über die Messung von t_{dunkel} kann somit der Energiesatz verifiziert werden:

$$E_{\text{ges}} = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} \quad \Rightarrow \quad E_{\text{pot}} \stackrel{(!)}{=} E_{\text{kin,max}} \quad (3.8)$$

$$\Rightarrow \quad mgh = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} \quad (3.9)$$

$$\Leftrightarrow \quad v_{\text{max}} = \sqrt{2gh} \quad (3.10)$$

Hierbei bezeichnen g die Fallbeschleunigung der Erde und h die Auslenkhöhe der Pendelmasse.

Aufgrund seiner räumlichen Ausdehnung müsste das Pendels korrekter Weise als physikalisches Pendel betrachtet werden (Vgl. Abb. 30).

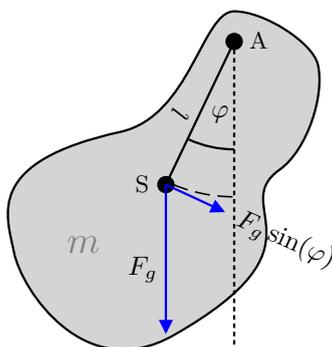


Abbildung 30: *Physikalisches Pendels*

Hierbei ist D das Drehmoment, Θ_A das Trägheitsmoment des Pendels bzgl. des Aufhängepunktes A , S der Schwerpunkt des Pendels, l der Abstand zwischen Aufhängepunkt und Schwerpunkt und F_g wie gehabt die Gravitationskraft der Erde. Für die Bewegungsgleichung des Pendels ergibt sich:

$$D = F_g l \sin(\varphi) \quad (3.11)$$

$$\Rightarrow \Theta_A \ddot{\varphi} = mgl \sin(\varphi) \quad (3.12)$$

$$\Rightarrow 0 \approx \ddot{\varphi} - \frac{mgl}{\Theta_A} \varphi \quad \left| \text{für kleine Winkel} \right. \quad (3.13)$$

Aus dieser Differentialgleichung lassen sich Winkelgeschwindigkeit ω , Periodendauer T , reduzierte Pendellänge l_r und Fallbeschleunigung g bestimmen:

$$\Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{mgl}{\Theta_A}} \quad \left| \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \right. \quad (3.14)$$

$$\Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{\Theta_A}{mgl}} \quad (3.15)$$

$$\Rightarrow g = \frac{4\pi^2 \Theta_A}{mT^2 l} \quad (3.16)$$

Für die *reduzierte Pendellänge* des physikalischen Pendels folgt:

$$2\pi \sqrt{\frac{\Theta_A}{mgl}} \stackrel{(!)}{=} 2\pi \sqrt{\frac{l_r}{g}} \quad (3.17)$$

$$\Rightarrow l_r = \frac{\Theta_A}{ml} \quad (3.18)$$

3.3 Versuchsaufbau

Der verwendete Pendelaufbau sieht wie folgt aus:

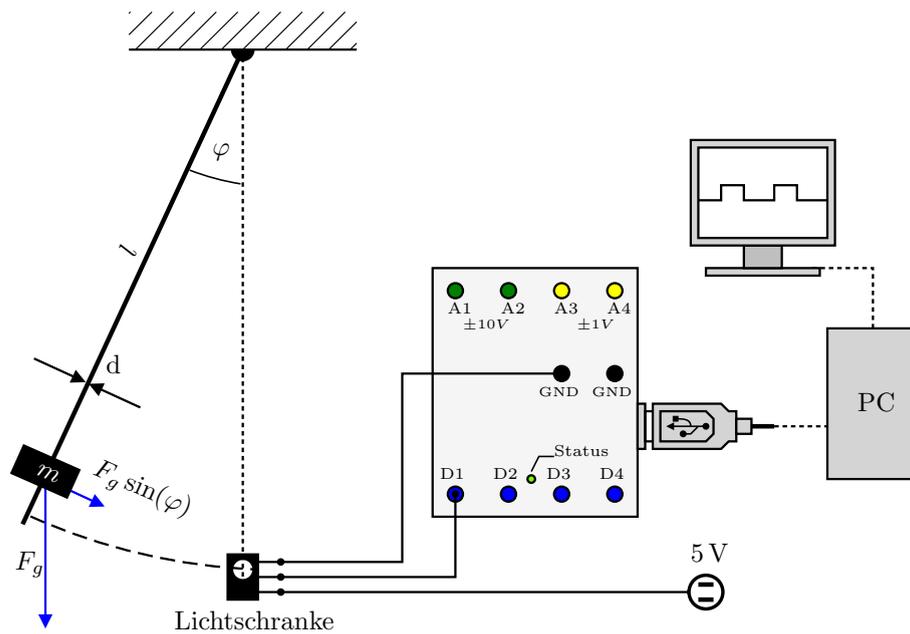


Abbildung 31: Schematischer Aufbau des Pendels (Die verwendete Lichtschranke wird über eine externe Spannungsquelle betrieben.)

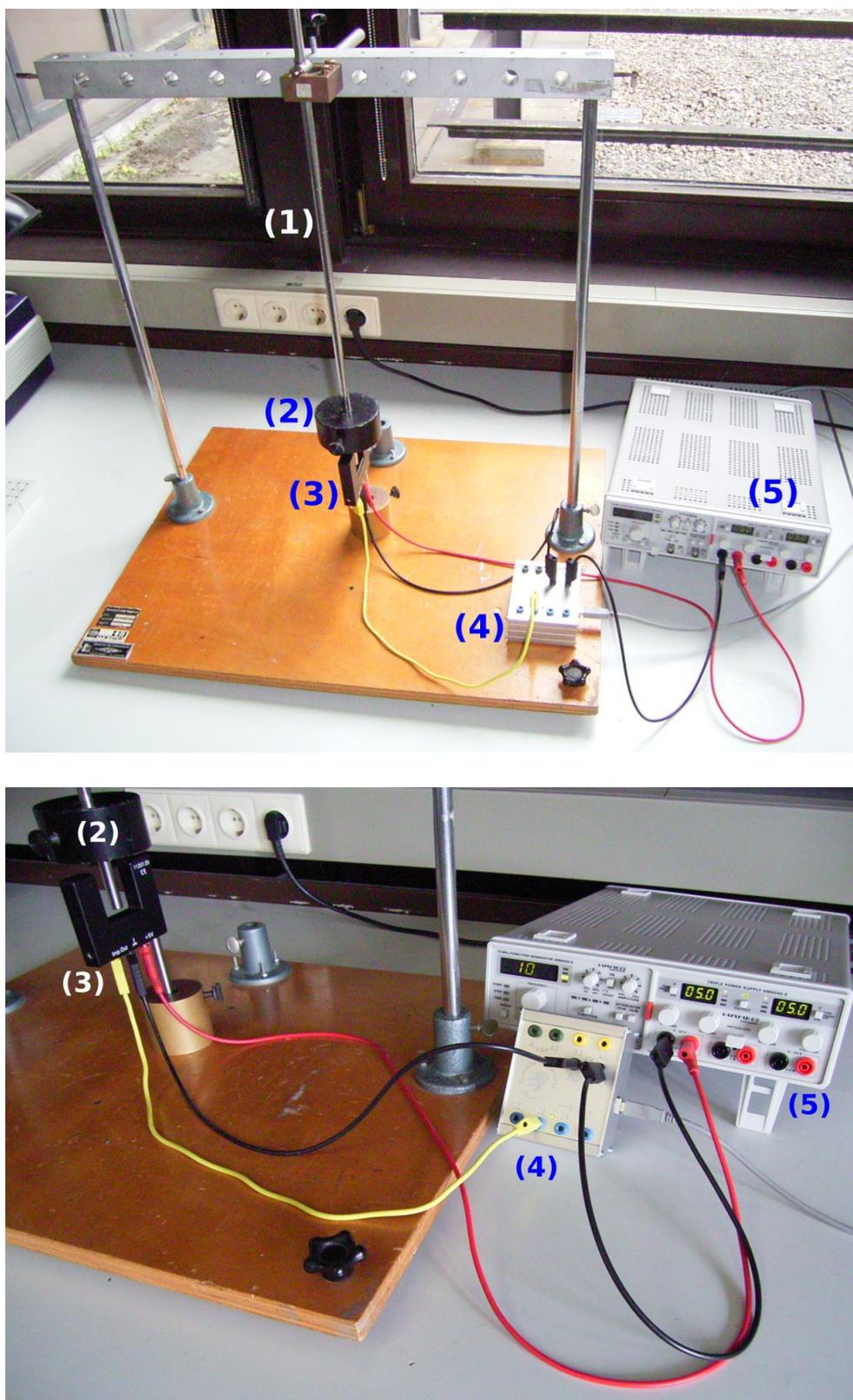


Abbildung 32: Beispielaufbau zum Pendel – (1) Pendel, (2) Pendelmasse, (3) Lichtschranke, (4) USB-Box, (5) Funktionsgenerator als 5 V-Spannungsquelle

3.4 Durchführung

Nach dem Aufbauen der Pendel-Apparatur nach dem in Abb. 31 dargestellten Schema, wird das entsprechende *LabView*-Programm *Pendel* gestartet, die als Datenquelle verwendete USB-Box und der genutzte Digitalkanal ausgewählt und das *Verbinden* mit der USB-Box über den gleichnamigen Druckknopf in der Programmoberfläche aktiviert. Zum Messen der Durchlaufzeit des Pendels muss die von der Lichtschranke gemessene Dunkelzeiten aufgenommen werden. Dies wird gewährleistet, indem der gewählte Kanal zusätzlich auf \checkmark *Invertiert* geschaltet wird (s. Abb. 34).

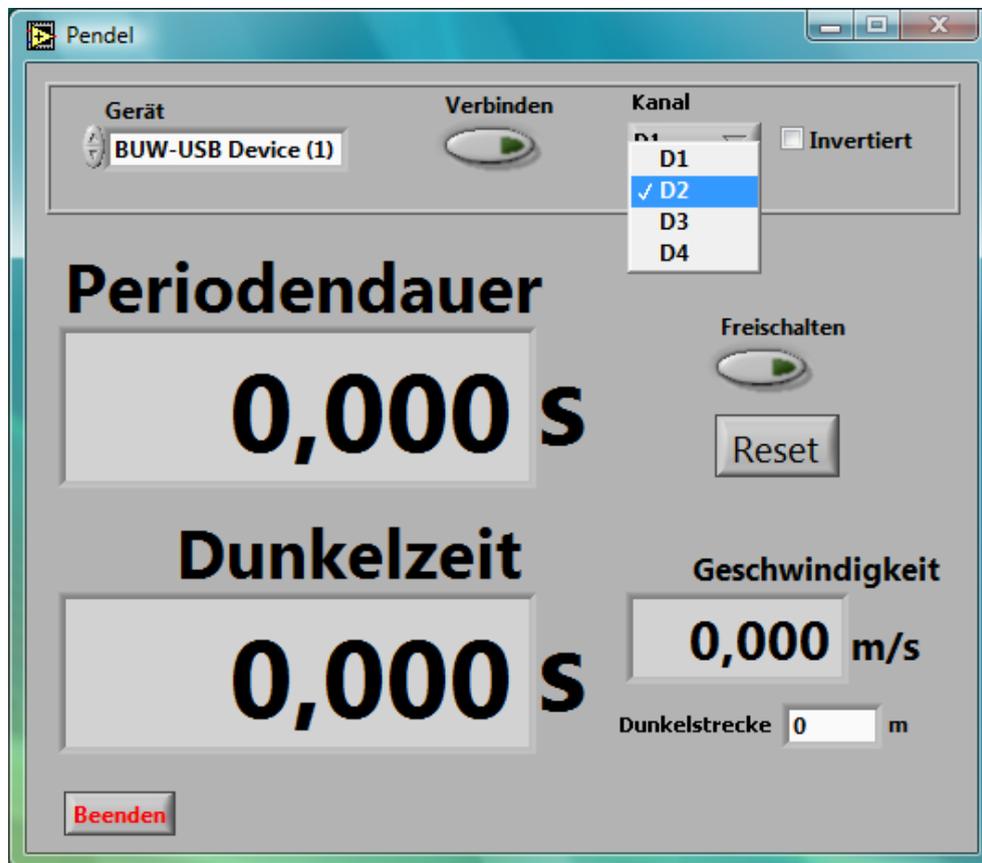


Abbildung 33: Verwendetes LabView-Programm „Pendel“ – Kanalauswahl

Das Programm zählt nach dem *Freischalten* durchgehend jeweils drei Lichtschrankendurchgänge – also ganze Pendelperioden – und berechnet bei Angabe der *Dunkelstrecke* (bei dem hier verwendeten Aufbau also der Dicke der verwendeten Pendelstange, welche beim Lichtschrankendurchgang für die Verdunkelung sorgt) auch die Geschwindigkeiten des Pendels beim Lichtschrankendurchgang (Vgl. Abb. 34).

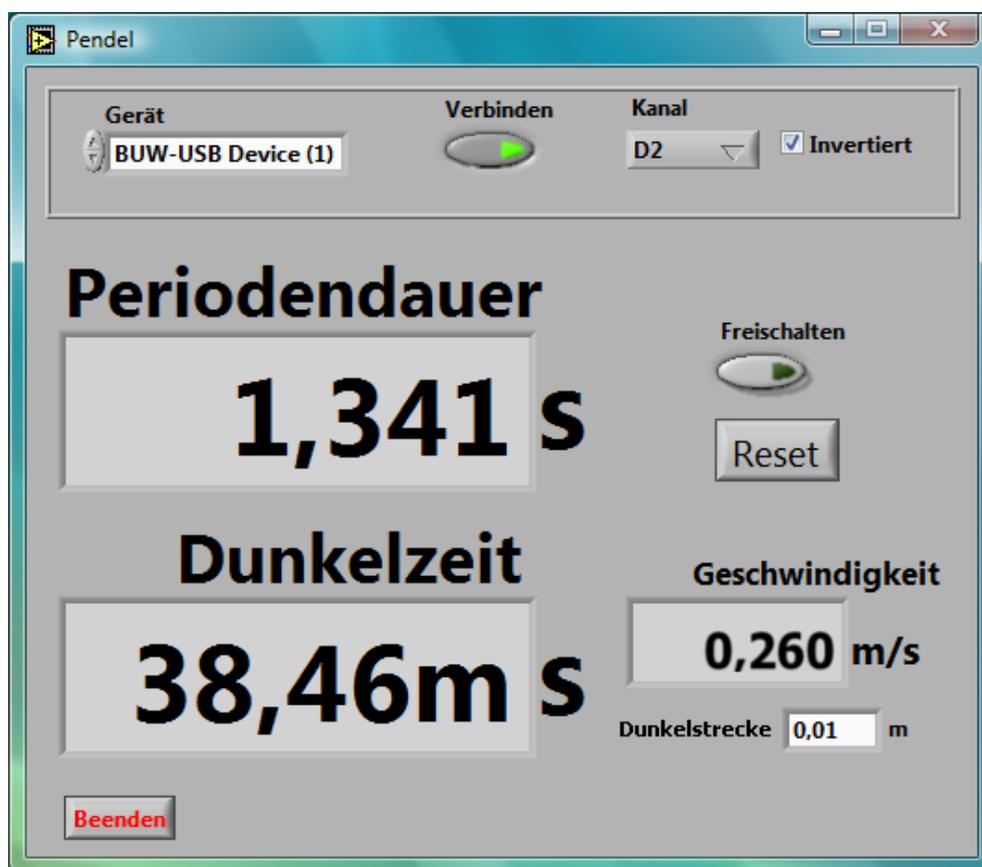


Abbildung 34: Messung einer Schwingungsperiode T : Der Messkanal (hier D2) muss auf \checkmark Invertiert geschaltet sein, um Dunkelzeiten zu messen. Bei einer angenommenen Pendelstangendicke von $d = 1 \text{ cm}$ erhält man im Bsp. eine Durchlaufgeschwindigkeit an der Lichtschranke von $c = 26 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$.

3.4.1 Beispielrechnung

Ein Pendel mit der Länge $l = 0,45 \text{ m}$ wird um einige Grad ausgelenkt. Beim Loslassen wird mit Hilfe der *Pendel*-Software eine Periodendauer von $T = 1,341 \text{ s}$ und am Tiefpunkt eine Dunkelzeit von $t_{\text{dunkel}} = 38,46 \text{ ms}$ gemessen (s. Abb. 34).

Bei einer Pendel(stangen)dicke auf Höhe der Lichtschranke von $d = 1 \text{ cm}$ resultiert hieraus eine Pendelgeschwindigkeit von $c = 0,26 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Nach Gl. (3.10) ergibt sich demnach für die ursprüngliche vertikale Höhenauslenkung der Pendelmasse – ausgehend vom mathematischen Pendel – ein Wert von ungefähr $0,34 \text{ cm}$, was einer Winkelauslenkung von ca. $7,1^\circ$ entspricht. Über Gl. (3.6) errechnet sich zudem ein Fallbeschleunigungswert von $g \approx 9,879 \text{ m/s}^2$

4 Messung minimaler Ströme – am Beispiel elektrischer Leitfähigkeit von Luft

4.1 Benötigte Geräte

Operationsverstärker-Box	Schutzwiderstand
Leybold-Kurzschlussstecker	2 Leybold-100 M Ω -Widerstände
Leybold-1 M Ω -Widerstand	Leybold-1 G Ω -Widerstand
Kerze oder radioaktives Präparat	Plattenkondensator

4.2 Der Versuch

Mit diesem Experiment lässt sich sehr gut darstellen, wie die elektrische Leitfähigkeit der Luft bei Ionisation – beispielsweise durch eine Kerze oder ein radioaktives Präparat – verändert wird.

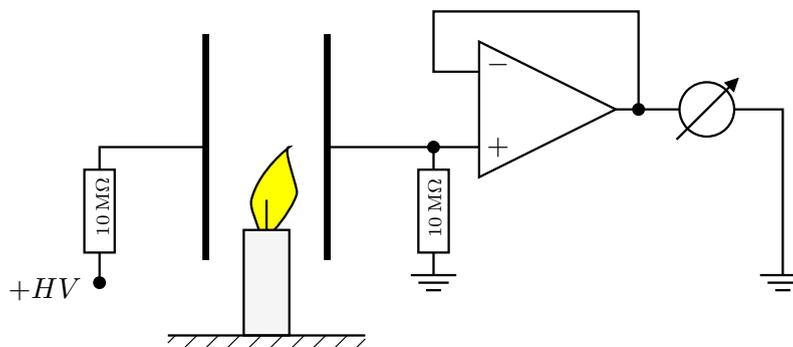


Abbildung 35: Schaltplan zum Aufbau

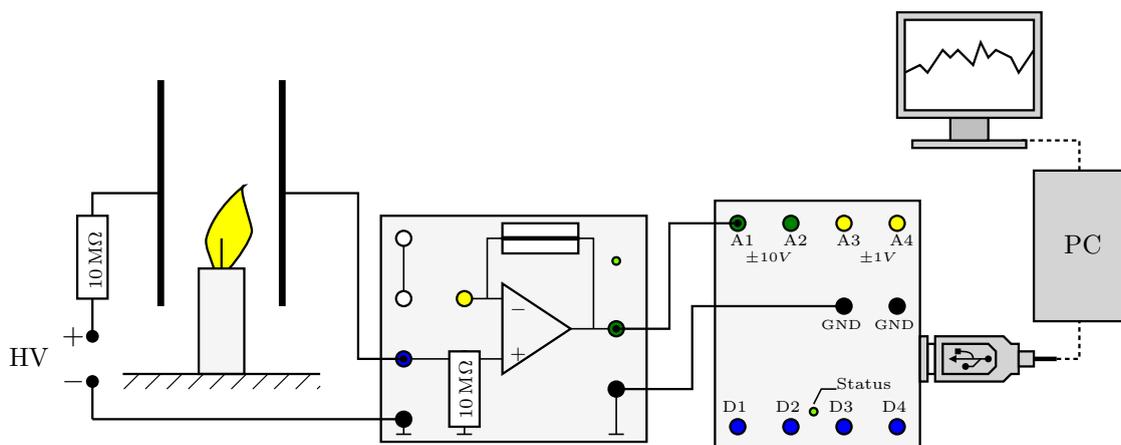


Abbildung 36: Schematischer Aufbau zur Leitfähigkeitsmessung der Luft unter Verwendung einer Kerze zwischen zwei Kondensatorplatten

4.3 Durchführung

Die Apparatur wird gemäß dem in Abb. 36 dargestellten Schema aufgebaut. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Hochspannung nicht zu groß gewählt wird, sodass es zwischen den Kondensatorplatten nicht zu einem Durchschlag kommt, da dies den Operationsverstärker zerstören würde!

Der abgebildete Aufbau (Abb. 37 – Abstand zwischen den Kondensatorplatten: 7 cm) wurde bis zu einer HV-Einstellung von bis zu 10 kV getestet. Jedoch lassen sich bereits recht gute Ergebnisse mit 2,5 kV erzielen, wenn man den Steck-Widerstand am Operationsverstärker (Abb. 38 (5)) entsprechend groß wählt – beginnen Sie beispielsweise die Messung mit 1 G Ω und versuchen es im Anschluss mit kleiner werdenden Widerständen (100 M Ω , 10 M Ω , 1 M Ω).

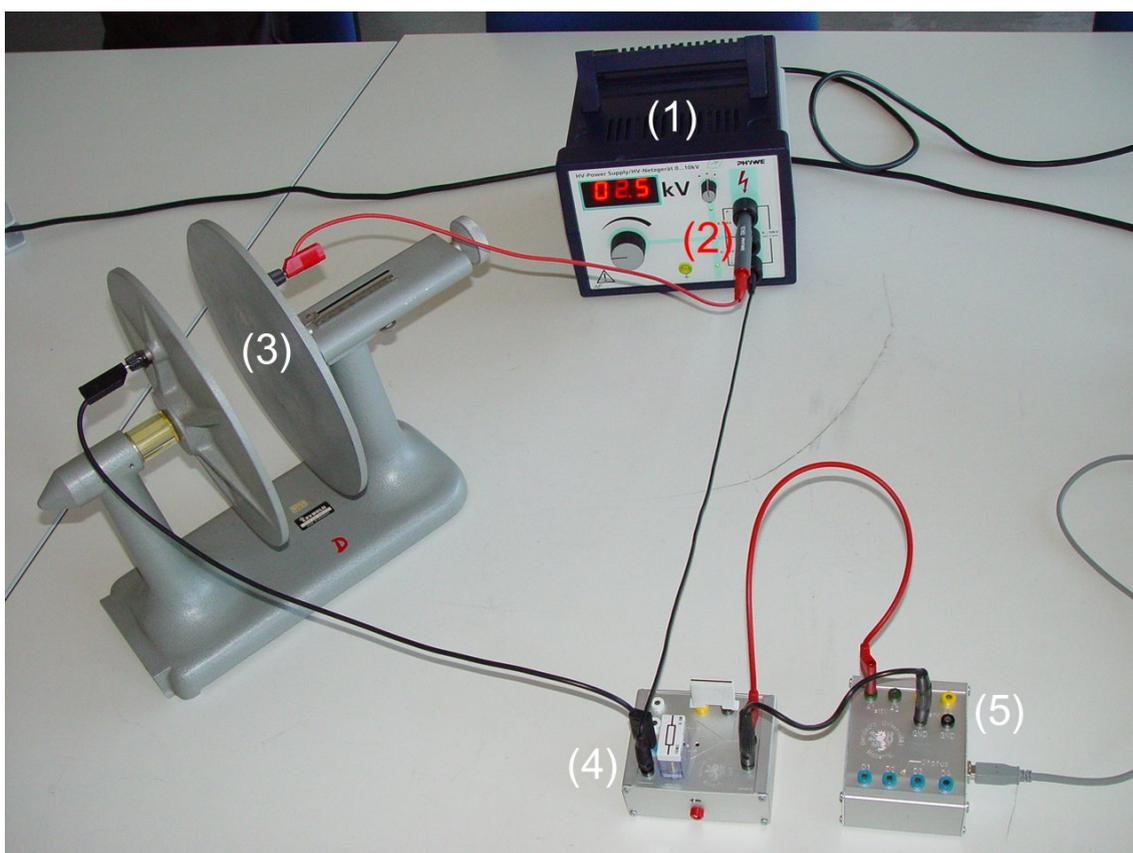


Abbildung 37: Beispielaufbau zur Luftleitfähigkeitsmessung – (1) HV-Gerät, (2) axialer 10 M Ω -Schutzwiderstand, (3) Plattenkondensator mit Kerze, (4) Operationsverstärker-Box, (5) USB-Box

Bei der Verkabelung erweist es sich im Umgang mit Hochspannung als sinnvoll, möglichst kurze Kabel – und diese, wo möglich, freischwebend – zu verwenden.

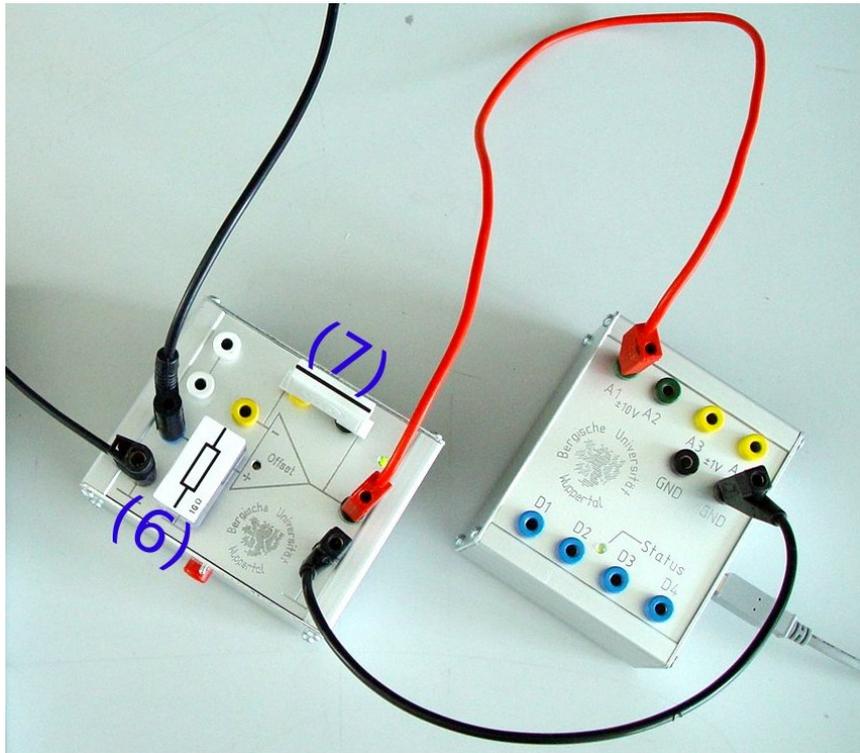


Abbildung 38: Verstärker- und USB-Box – (2) $10\text{ M}\Omega$ -Widerstand, (6) $1\text{ G}\Omega$ -Widerstand, (7) Kurzschlussstecker

Zudem ist am HV-Gerät ein axialer Schutzwiderstand zu verwenden, welcher direkt in die \oplus -Pol-Buchse zu stecken ist (s. Abb. 39).

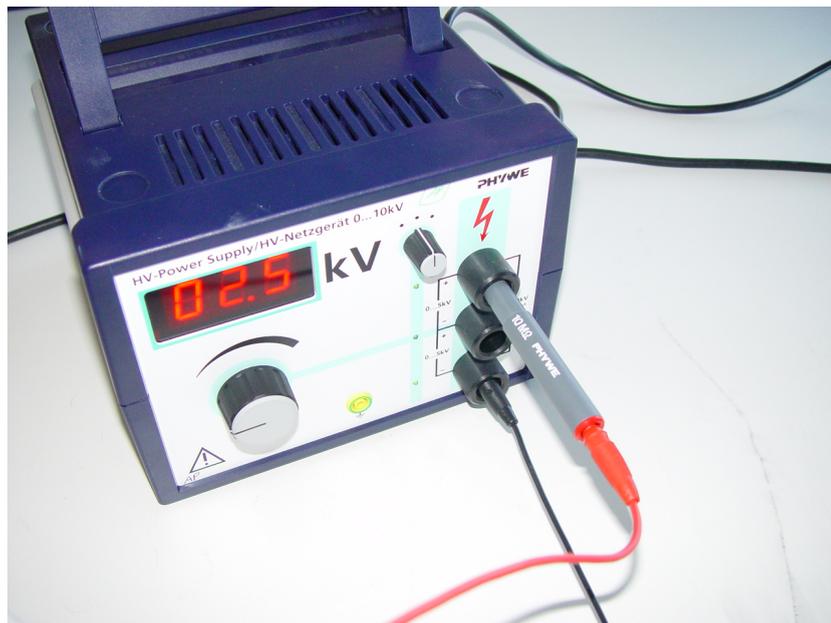


Abbildung 39: axialer $10\text{ M}\Omega$ -Schutzwiderstand am HV-Gerät

Nach dem Aufbauen wird das LabView-Programm DVM (Digitalvoltmeter) gestartet, die als Datenquelle verwendete USB-Box und der genutzte Analogkanal (A1 und A2 für den Bereich ± 10 V, A3 und A4 für den Bereich ± 1 V) ausgewählt und das Verbinden mit der USB-Box über den gleichnamigen Druckknopf in der Programmoberfläche aktiviert.

4.3.1 Auswertung – Bestimmung des Leckstroms

Um den durch die Luftionisation hervorgerufene Leckstrom I_L zwischen den Kondensatorplatten zu bestimmen, wird im Prinzip die über den in Abb. 40 dargestellten Widerstand R abfallende Spannung U_R gemessen.

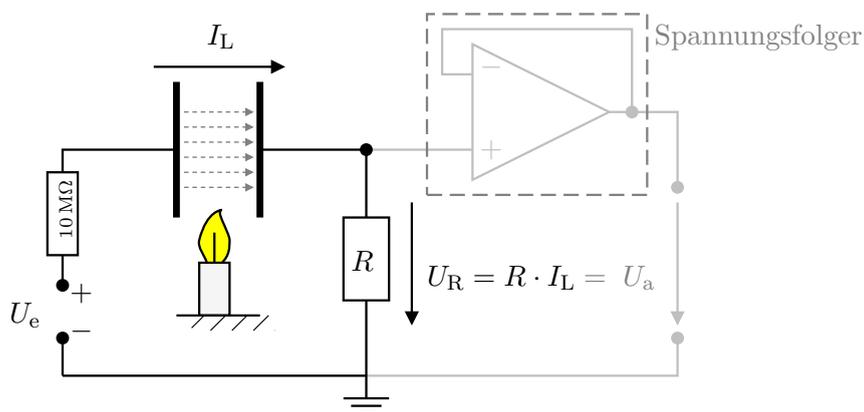


Abbildung 40: Bestimmung des Leckstroms I_L über Messung des Spannungsabfalls U_R am Widerstand R – der Operationsverstärker ist hierbei als Spannungsfolger (Eingangs- gleich Ausgangsspannung) geschaltet.

U_R entspricht hierbei der Ausgangsspannung U_a am Operationsverstärker, welcher über den kurzgeschlossenen invertierenden Eingang als Spannungsfolger geschaltet ist (Vgl. Abb. 41).

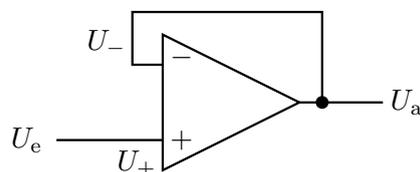


Abbildung 41: Operationsverstärker als Spannungsfolger – Kurzschließen des Ausgangs mit dem invertierten Eingang

Die Spannungsverstärkung ergibt sich bei dieser Schaltung aus folgender Rechnung:

$$U_a = k \cdot (U_+ - U_-) \quad (4.1)$$

$$\Rightarrow \quad = k \cdot (U_+ - U_a) \quad (4.2)$$

$$\Leftrightarrow \quad U_a(1 + k) = k \cdot U_+ \quad (4.3)$$

$$\Leftrightarrow \quad U_a = \frac{k}{1 + k} \cdot U_+ \quad \left| \quad k \gg 1 \quad (4.4)$$

$$\Rightarrow \quad U_a \approx U_+ = U_e \quad (4.5)$$

Man erhält letztlich für den Leckstrom:

$$U_R = R \cdot I_L \quad \Leftrightarrow \quad I_L = \frac{U_R}{R} \quad (4.6)$$

Da es sich hierbei um recht kleine Ströme ($\sim 10^{-9}$ A) handelt und das DVM Spannungen im Volt-Bereich misst, sollten hierbei vergleichsweise große Widerstände ($\sim G \Omega$) verwendet werden.

Auf der nächsten Seite sind zwei Beispielaufnahmen mit dem DVM dargestellt:

4 Messung minimaler Ströme – am Beispiel elektrischer Leitfähigkeit von Luft

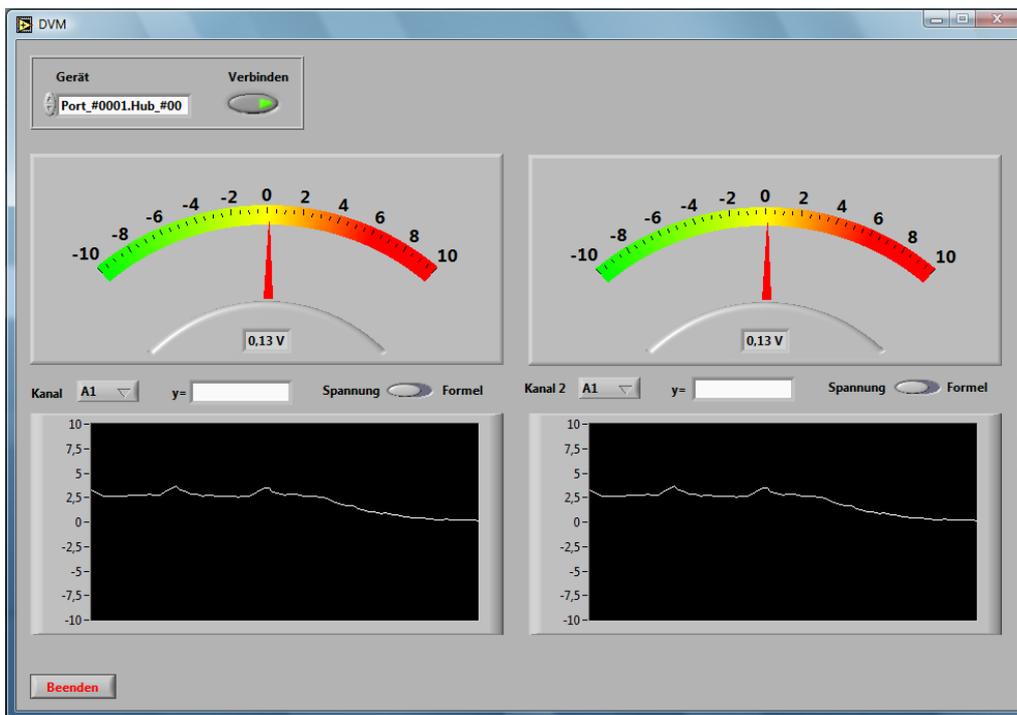


Abbildung 42: Mit abnehmender Spannung am Kondensator nimmt auch der gemessene Stromfluss ab (hier wurde ein $10\text{ M}\Omega$ -Widerstand am Verstärker verwendet und die Spannung von $2,5\text{ kV}$ auf 0 kV heruntergeregelt).



Abbildung 43: Messung bei 4 kV

5 Ladung auf einen Kondensator schaufeln

5.1 Benötigte Geräte

HS-Generator und Plattenkondensator
FARADAY-Becher
2 Lichtschranken
3 Bananenstecker-Kabel
USB-Box

Operationsverstärker-Box
Leybold-Kuzschlusstecker
Leybold-10 nF(/1 nF/100 nF)-Steckkapazität
Ladungsschaufel (Metallkugel an Kunststoffstab,
isolierter Schraubendreher, usw.)

5.2 Der Versuch

Mit diesem Experiment lassen sich die Kapazitäten von verschiedenen Gegenständen messen.

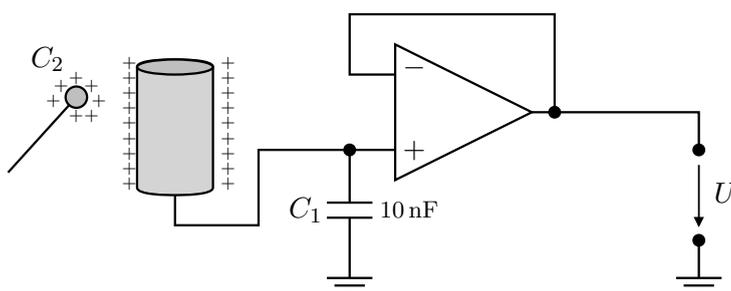


Abbildung 44: Schaltplan zum Aufbau

Die durch die Ladungsschaufel übertragene Ladung Q lässt sich über die mit der USB-Box gemessenen Spannung U und der bekannten Kapazität C_1 bestimmen.

$$Q = C_1 U \quad (5.1)$$

Über diesen berechneten Wert und die zum Laden der Schaufel verwendete Hochspannung U_{HV} , ergibt sich dann die Kapazität der Ladungsschaufel zu:

$$C_2 = \frac{Q}{U_{\text{HV}}} = \frac{C_1 U}{U_{\text{HV}}} \quad (5.2)$$

5.3 Durchführung

Wie bei der Luftleitfähigkeitsmessung kann auch hier das *LabView*-Programm *DVM* (*Digitalvoltmeter*) verwendet werden. Sind alle Geräte angeschlossen und ist das Programm gestartet, so können mit unterschiedlichen isolierten Gegenständen Ladungsportionen auf den FARADAY-Becher geschaufelt werden.

Um möglichst effizient Ladung auf die verwendeten Schaufeln zu übertragen, empfiehlt es sich, an den HV-Generator einen Plattenkondensator anzuschließen, von dem sich aufgrund seiner hohen Kapazität ausreichend viel Ladung abgreifen lässt.

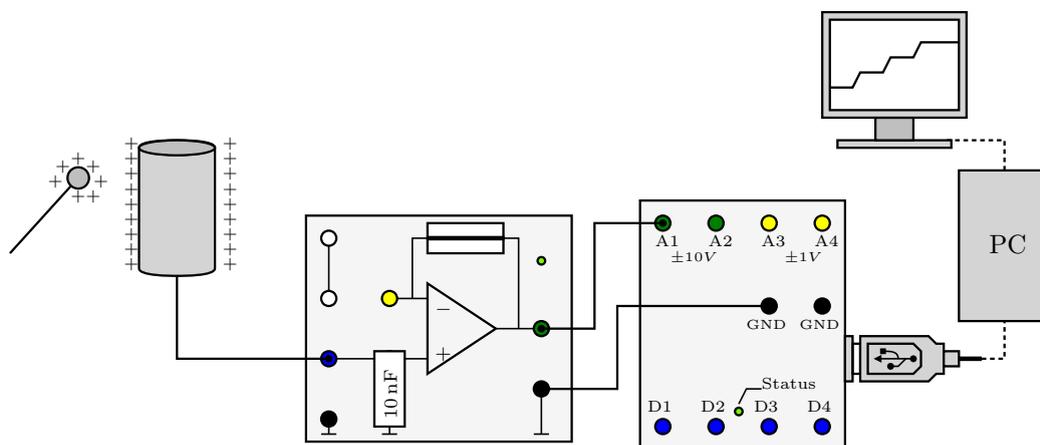


Abbildung 45: Schematischer Aufbau der Ladungsschaukel

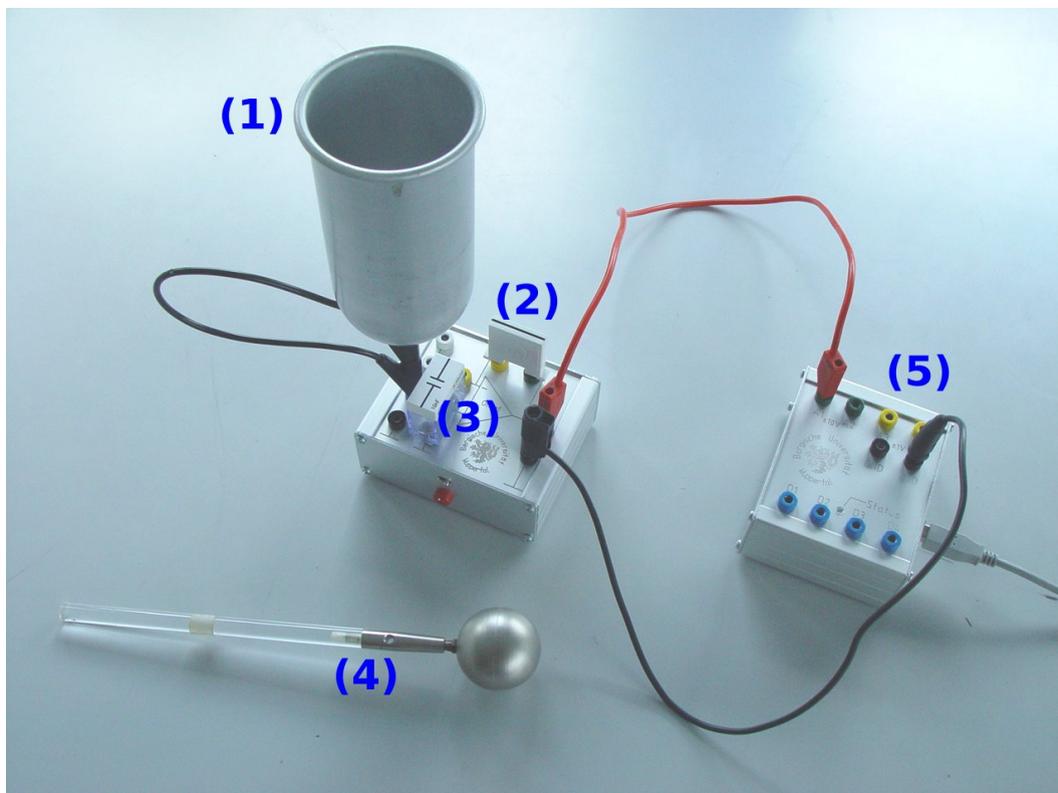


Abbildung 46: Beispielaufbau zur Ladungsschaukel – (1) FARADAY-Becher, (2) Kurzschlussstecker, (3) 10 nF-Kapazität, (4) isolierter Metallkugel-Stab, (5) USB-Box

Nach dem Übertragen der Ladung von der Schaukel auf den FARADAY-Becher, kann über die gemessene Spannung wie oben beschrieben die Kapazität der Ladungsschaukel selbst bestimmt werden. Neben dem Standardinstrument der isolierten Metallkugel (s. Abb. 46) können hier z.B. auch isolierte Schraubendreher oder Ähnliches verwendet werden. Im

Folgenden sind ein paar Messläufe dargestellt. Die geschaukelten Ladungsportionen werden hier sehr schön sichtbar:



Abbildung 47: Schrittweises Aufladen des FARADAY-Behlers unter Verwendung des Metallkugelstabes und einer 10 nF -Kapazität bei $+2\text{ kV}$



Abbildung 48: Schrittweises Aufladen des FARADAY-Behlers unter Verwendung des Metallkugelstabes und einer 1 nF -Kapazität bei 2 kV

6 Pulsmessung mit einer Infrarotlichtschranke

6.1 Benötigte Geräte

10 V-Spannungsquelle (Generator, 9 V-Blockbatterie)	Leybold-10 μF (/1 μF)-Steckkapazität
5 Bananenstecker-Kabel	Leybold-10 nF-Steckkapazität
USB-Box	Leybold-1 k Ω -Steckwiderstand
Fingerpulssensor ¹ (<i>Kettler Cardio Ohrclip</i>)	2 Leybold-100 k Ω -Steckwiderstände
Leybold-Adapter-Steckelement für Fingerpulssensor ²	Leybold-1 M Ω -Drehpotenziometer

6.2 Der Versuch

Bei diesem Aufbau kommt ein Fingerpulssensor¹ von *Kettler* zur Anwendung. Dieser besteht im Wesentlichen aus einer Infrarot-LED und einem Phototransistor in Lichtschrankenordnung. Der pulsierende Blutstrom eines dazwischengeklemmten Fingers schwächt das Infrarotlicht der LED periodisch ab und reduziert somit entsprechend den am Phototransistor erzeugten Photostrom, sodass der Puls am Oszillographen sichtbar gemacht werden kann. Hierfür wird das *LabView*-Programme *Scope* verwendet.

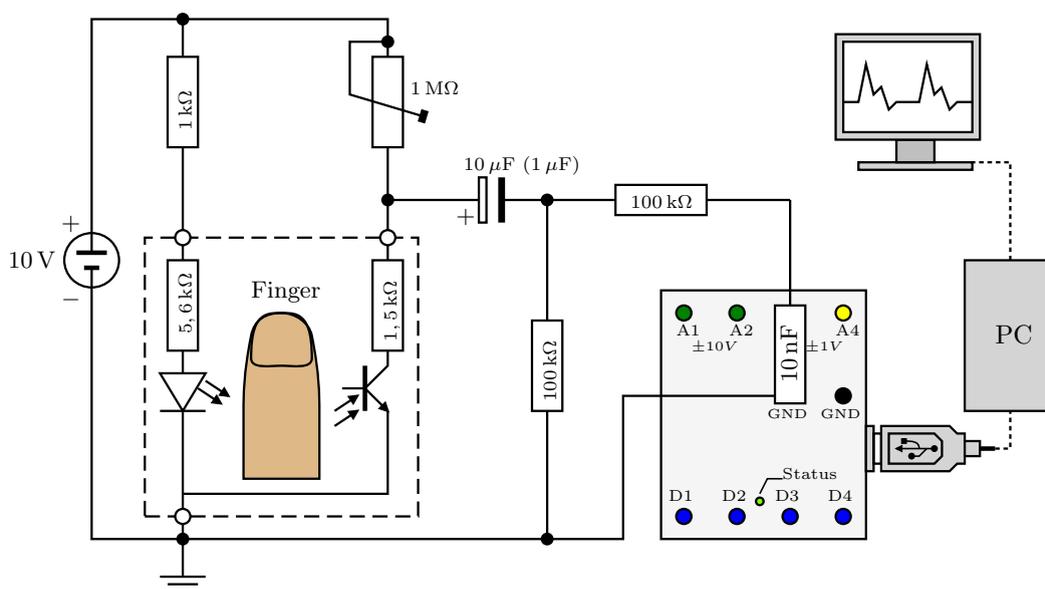


Abbildung 49: Schematischer Aufbau des Pulsmessgerätes

¹Dieser sog. *Kettler Cardio Ohrclip* wird bei *Kettler* unter der Art.-Nr.: 07937 – 700 geführt. Die Kosten für dieses Gerät belaufen sich je nach Händler auf knapp 20€.

²Ein Prototyp dieses Adapters wird für die Lehrerfortbildung gestellt. Für für die Anwendung in den einzelnen Schulen müssen jedoch eigens Neue zusammengelötet werden. Der Aufbau des Adapters (Abb. 52, (5)) ist in Abb. 51 dargestellt.

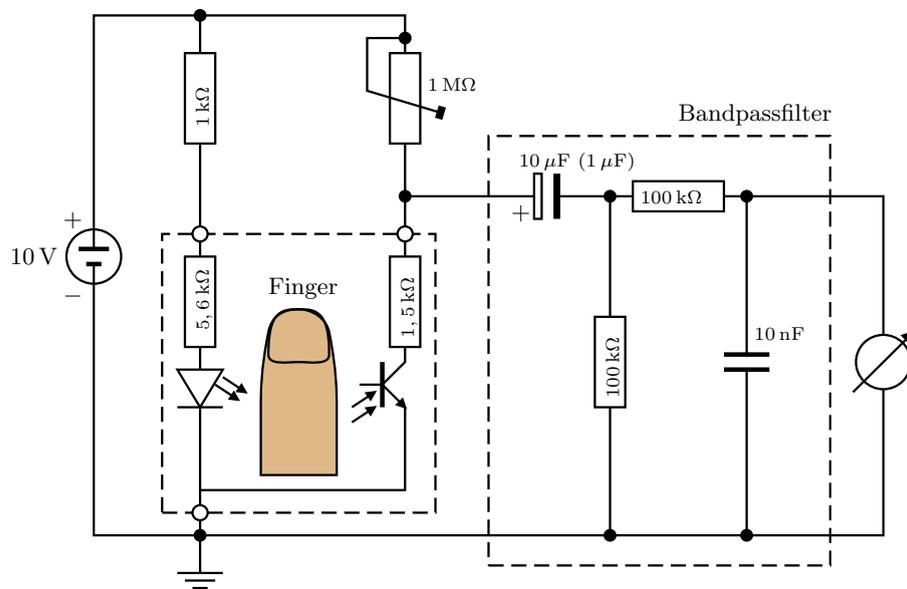


Abbildung 50: Schaltplan zum Aufbau mit Fingerpulssensor

Für eine störungsfreie Weiterverarbeitung muss dieses Signal noch über einen Bandpass gefiltert werden (s. Abb. 50). Der Fingerpulssensor verfügt über einen Klinkenstecker, der über das in Abb. 51 (rechts), 53, 52 dargestellten Steckelement in die Schaltung integriert werden kann.

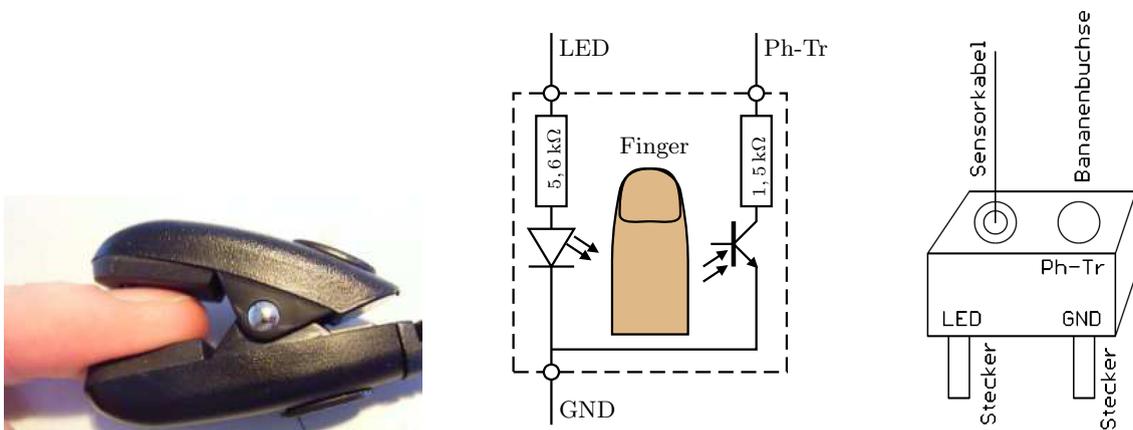


Abbildung 51: Fingerpulssensor, Innenbeschaltung und Abbildung des Adapter-Steckelements

6.3 Durchführung

Die Schaltung kann auf einem Steckbrett wie in den Abbn. 52 und 53 dargestellt, zusammengebaut werden. Hierbei wird der Fingerpulssensor extern mit einer 10 V-Spannung versorgt (hier wäre auch eine 9 V-Blockbatterie denkbar).

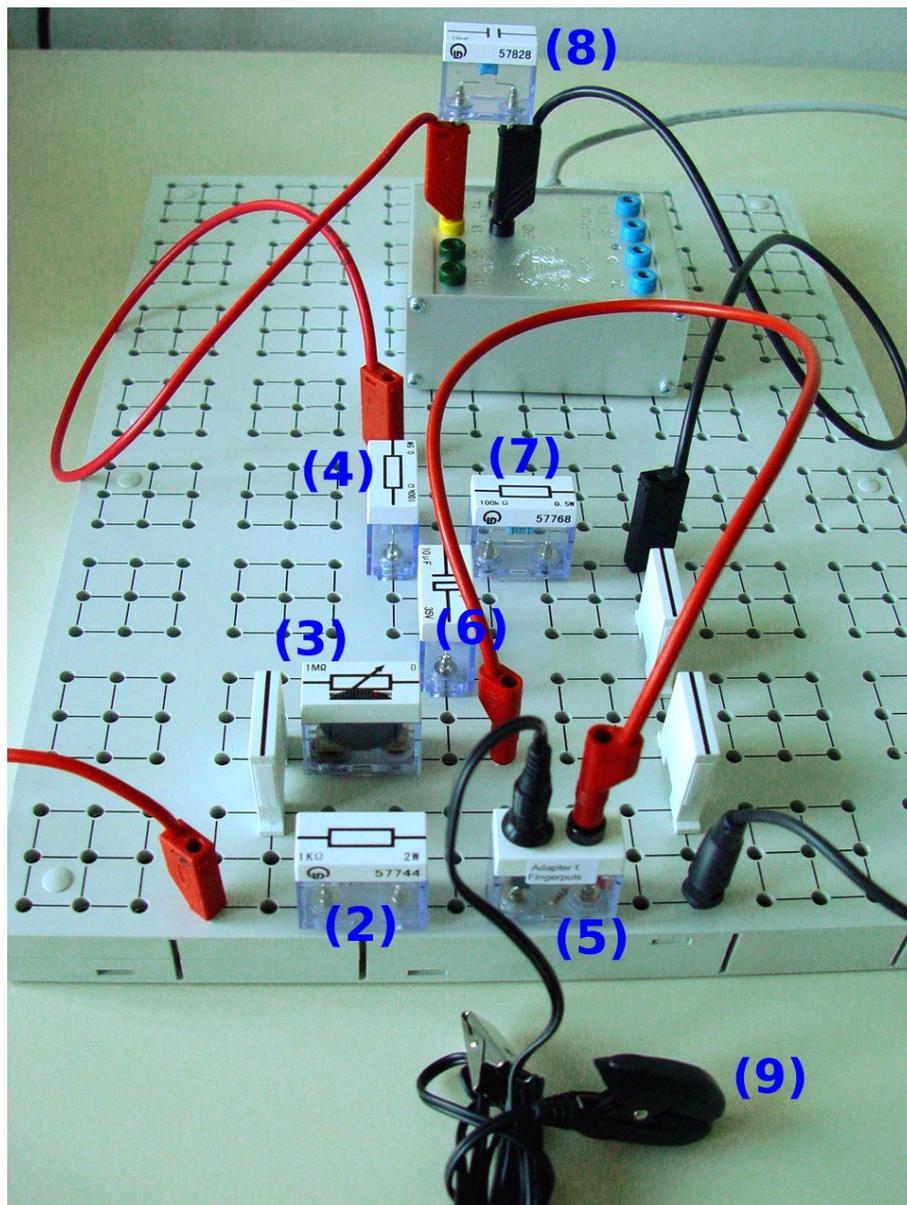


Abbildung 52: *Fingerpulssensor: Steckbrettanordnung der elektronischen Bauteile: (2) 1 k Ω -Widerstand, (3) 1 M Ω -Drehpotenziometer, (4)/(7) 100 k Ω -Widerstände, (5) Fingerpulssensor-Steckadapter, (6) 10 nF-Kapazität, (8) 10 μ F-Kapazität, (9) Fingerpulssensor*

Es ist sinnvoll, den Kondensator des Tiefpassfilters direkt, wie in Abb. 54 dargestellt, auf den mit der USB-Box verbundenen Bananensteckern zu platzieren, um unnötige induktionsbedingte Störeffekte in langen Kabeln zu vermeiden.

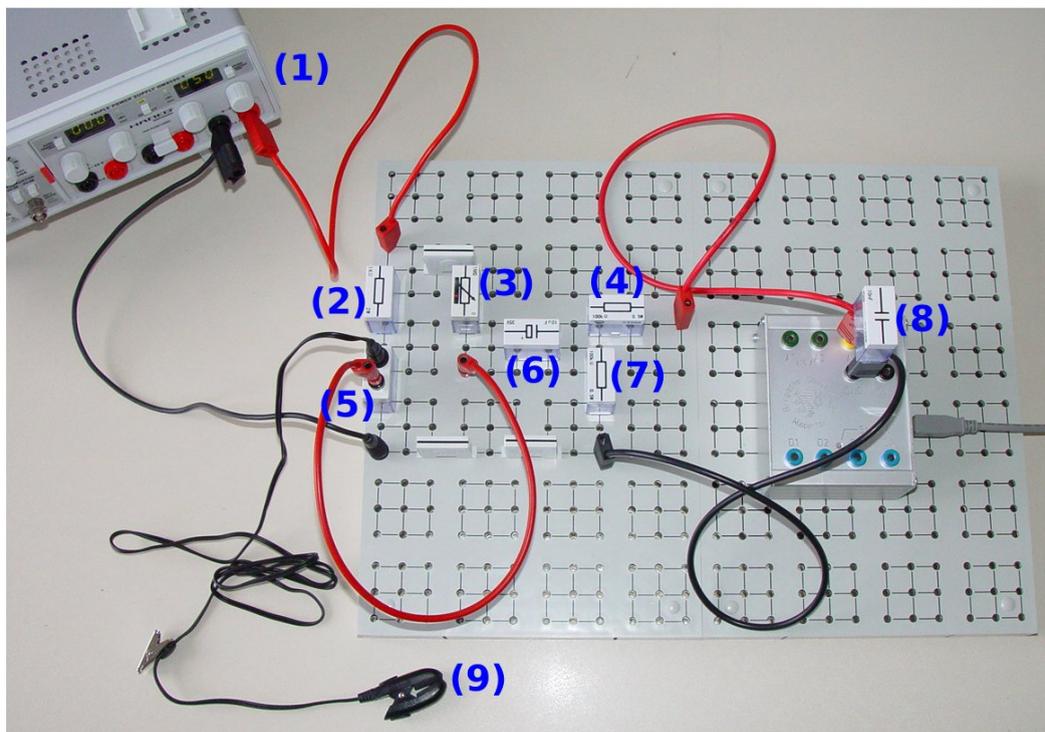


Abbildung 53: *Fingerpulssensor: Steckbrettanordnung der elektronischen Bauteile: (1) 9 V-Spannungsquelle (2) 1 k Ω -Widerstand, (3) 1 M Ω -Drehpotenziometer, (4)/(7) 100 k Ω -Widerstände, (5) Fingerpulssensor-Steckadapter, (6) 10 nF-Kapazität, (8) 10 μ F-Kapazität, (9) Fingerpulssensor*

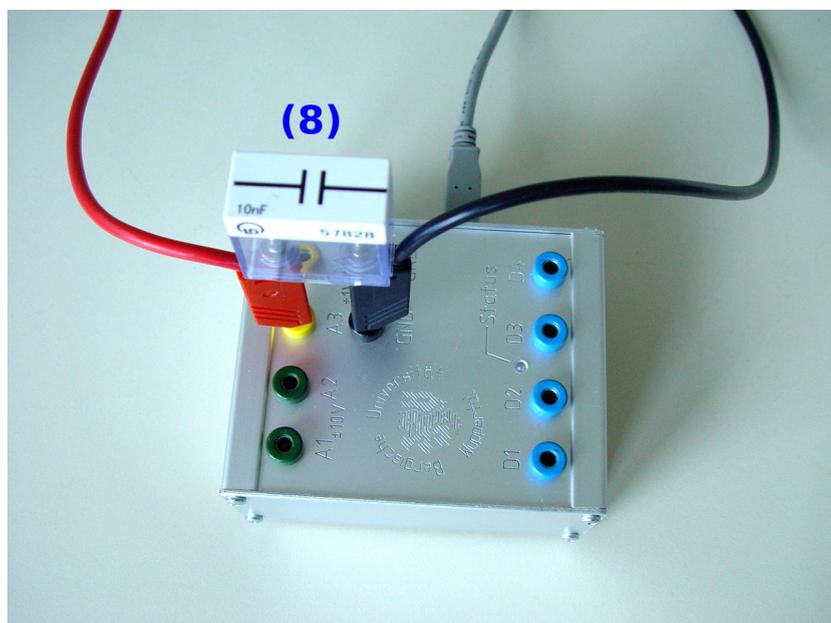


Abbildung 54: *Pulsmessung: Rauschunterdrückung mittels Kondensator (10 nF) an der USB-Box*

Nachdem die USB-Box mit dem PC verbunden und das Programm *Scope* aktiviert wurde, muss – wie in der Einleitung beschrieben – zunächst die angeschlossene USB-Box im *Scope* als Signalquelle angegeben werden.

Mit den korrekten Einstellungen können nun die vom Fingerpulssensor aufgenommenen Signale im Darstellungsfenster des Oszilloskops (gleichnamiger Reiter) betrachtet werden (Abb. 55 und 56). Signalstärke und horizontale Position lassen sich mittels Amplituden-/Offset-Einstellungen am Scope, sowie über das Drehpotenziometer am Steckbrett einstellen.

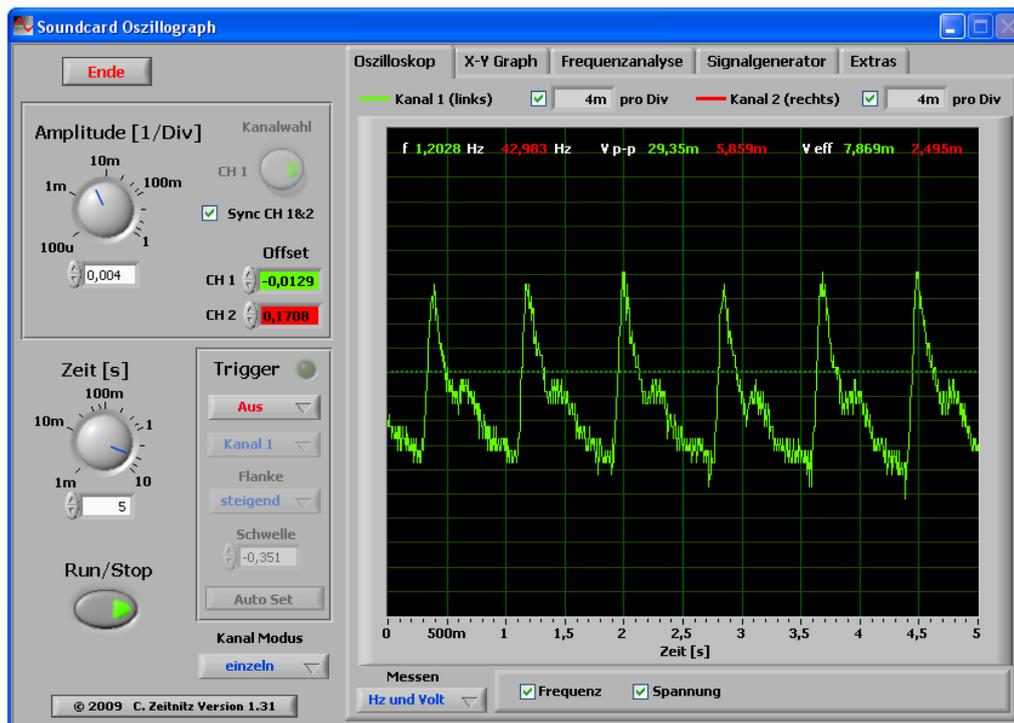


Abbildung 55: Regelmäßiger Puls am LabView-Scope dargestellt

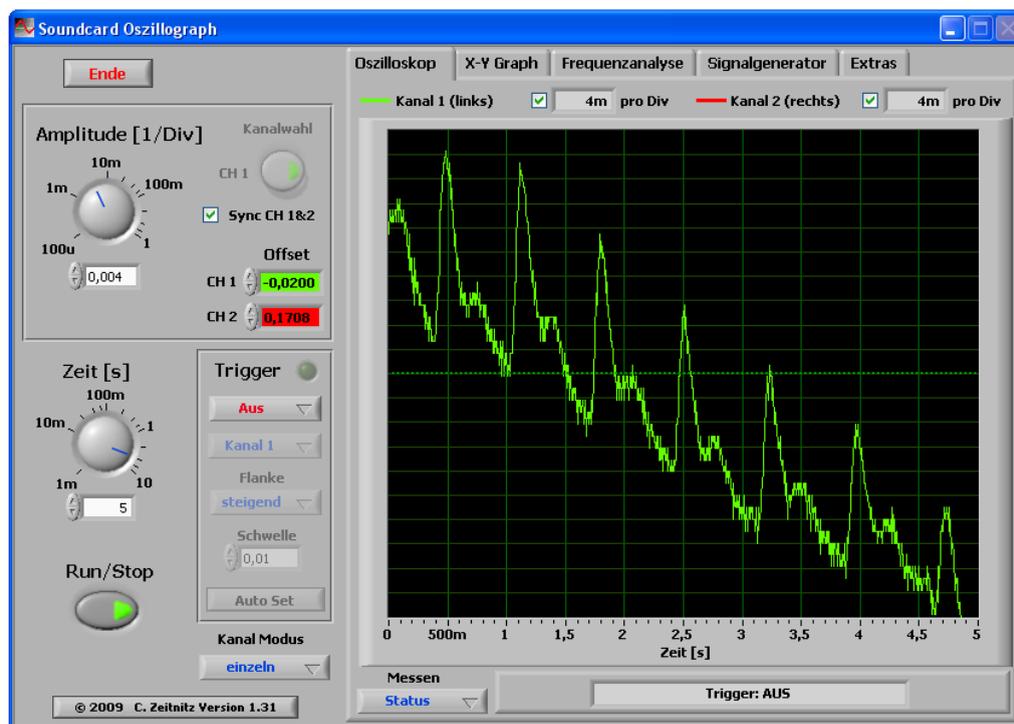


Abbildung 56: Der Pulsmesser reagiert empfindlich auf Blutdruckänderungen, bedingt z.B. durch Anheben oder Absenken des Armes.

7 Impulsübertrag

7.1 Benötigte Geräte

Luftkissenschiene mit 2 Gleitschlitten
2 Lichtschranken

USB-Box
Bananenstecker-Kabel

7.2 Der Versuch

Mit diesem Programm lassen sich Messwerte bei Experimenten zur Impulserhaltung aufnehmen. Es misst die Dunkelzeiten bei Lichtschrankendurchgängen und nimmt dabei vier Messwerte auf.

Auf der linken Seite erscheinen die Dunkelzeit-Messwerte der über den USB-Box-Digitalkanal D1 angeschlossenen ersten Lichtschranke, auf der rechten Seite diejenigen Messwerte der zweiten Lichtschranke (Digitalkanal D2). Zur Messung der Dunkelzeit sind die Kanäle hier auf *invertiert* geschaltet.

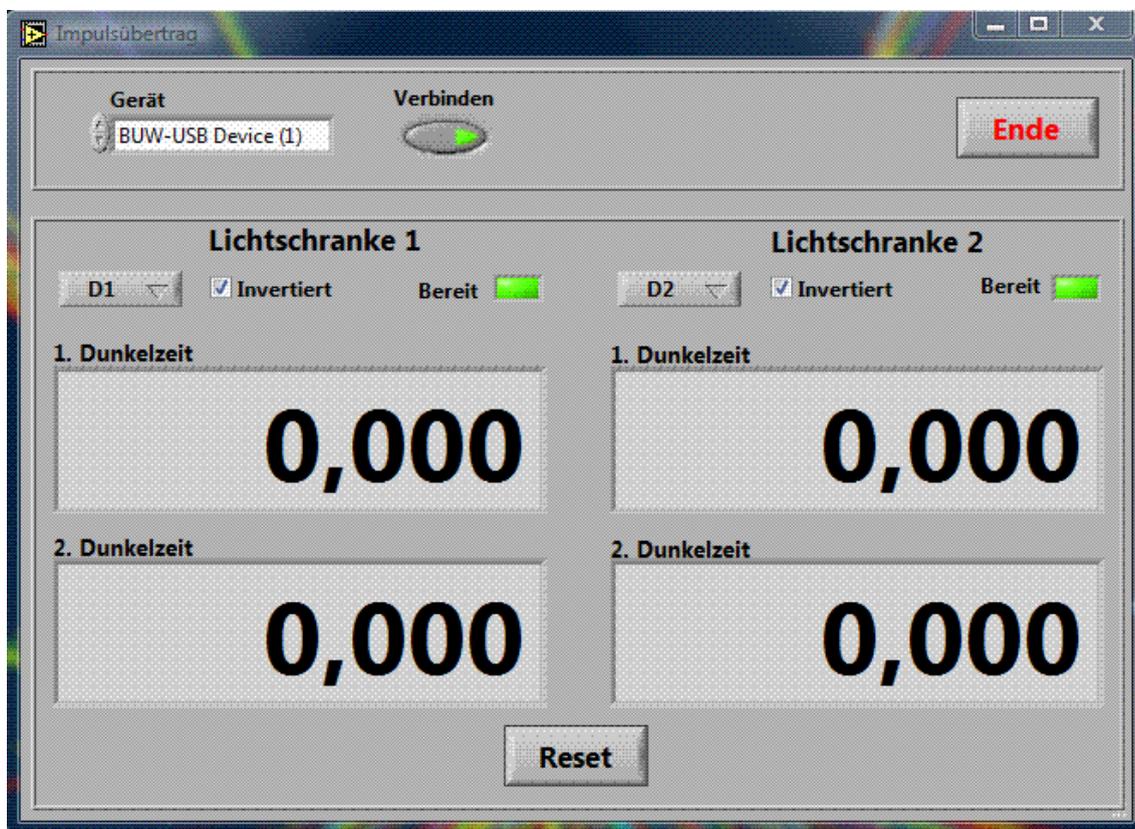


Abbildung 57: LabView-Programm Impulsübertrag: Im Fenster „Gerät“ kann bei mehreren angeschlossenen Geräten die gewünschte USB-Box ausgewählt werden. Über die Schaltflächen D1 und D2 lassen sich die bei der Messung verwendeten Digitalkanäle einstellen. Bestätigung der Optionen „invertiert“ bewirkt ein Messen der Dunkelzeiten. Nach dem „Verbinden“ können die Messungen gestartet werden. Mittels „Reset“ werden alle vier Messwerte auf Null gesetzt.

Als Anwendungsbeispiel für das Programm sind elastische Stöße beispielsweise von Gleitschlitten auf einer Luftkissenbahn zu nennen:

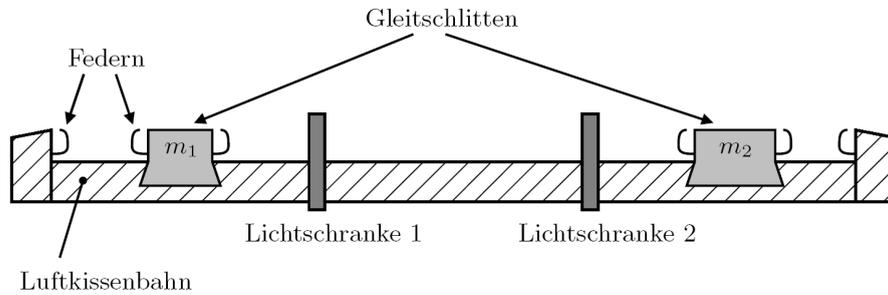


Abbildung 58: Luftkissenbahn – Schema

Über Dunkelzeitmessung können hierdurch bei bekannten Schlittenlängen und über deren Massen die entsprechenden Impulse vor ($p_{1,2}^{(1)}$) und nach dem Stoß ($p_{1,2}^{(2)}$) berechnet und somit die Impulserhaltung via

$$p_1^{(1)} + p_2^{(1)} = p_1^{(2)} + p_2^{(2)} \quad (7.1)$$

$$m_1 v_1^{(1)} + m_2 v_2^{(1)} = m_1 v_1^{(2)} + m_2 v_2^{(2)} \quad (7.2)$$

verifiziert werden. Man Betrachte Abb. 59:

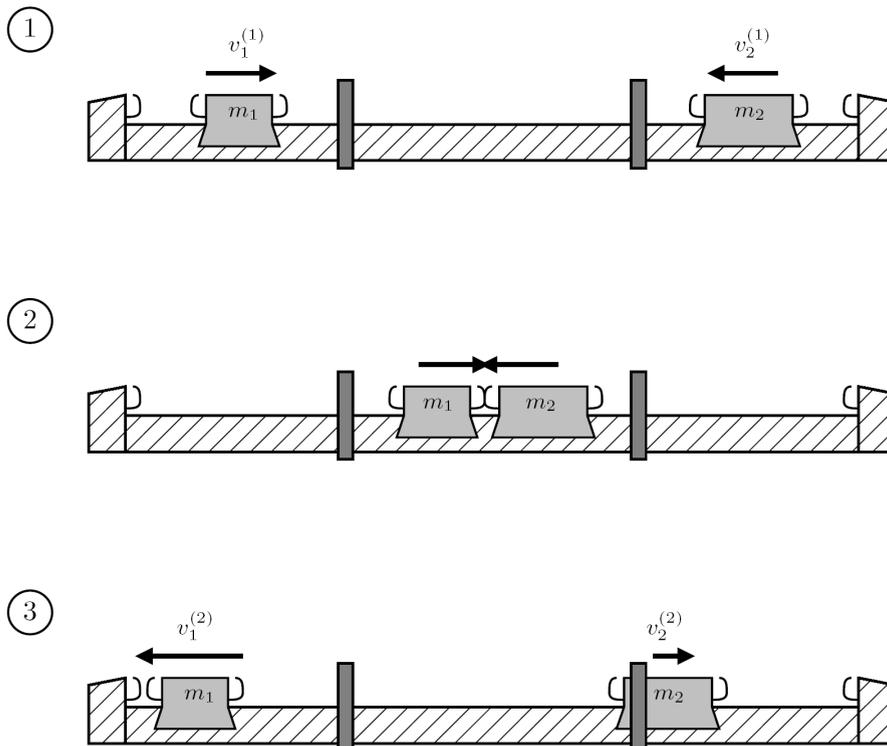


Abbildung 59: Elastischer Stoß von zwei Gleitschlitten mit den Massen m_1 und m_2 auf einer Luftkissenbahn

1. Zu Beginn der Messung befindet sich Gleitschlitten Nr.1 auf der linken Seite der Lichtschranke 1 und Schlitten Nr.2 auf der rechten Seite der Lichtschranke 2.
2. Aus dieser Position heraus werden sie dann mit den Geschwindigkeiten $v_1^{(1)}$ und $v_2^{(1)}$ zwischen den beiden Lichtschranken zur Kollision gebracht. Dabei passieren die beiden Schlitten die jeweiligen Lichtschranken zum ersten Mal, wobei die ersten beiden Dunkelzeiten registriert werden.
3. Je nach Massen- und Geschwindigkeitsverteilung passieren die Schlitten, nach dem elastischen Stoß mit den neuen Geschwindigkeiten $v_1^{(2)}$ und $v_2^{(2)}$ versehen, nun die Lichtschranken erneut in entgegengesetzter Richtung, wobei die zweiten Dunkelzeiten registriert werden, welche sich von den zuerst gemessenen Zeiten in Abhängigkeit vom Impulsübertrag beim Stoß unterscheiden.

7.3 Durchführung

Der Versuch kann beispielsweise wie in den Abbn. 60 bis 63 dargestellt aufgebaut werden. Nach Einschalten der 5 V-Versorgungsspannung für die Lichtschranken, wird das LabView-Programm *Impulsübertrag* gestartet und die angeschlossene USB-Box, sowie die verwendeten Digitalkanäle ausgewählt. Um Dunkelzeiten zu messen, werden beide Kanäle zudem durch anklicken der entsprechenden Kästchen auf *invertiert* gestellt (s. Abb. 57).

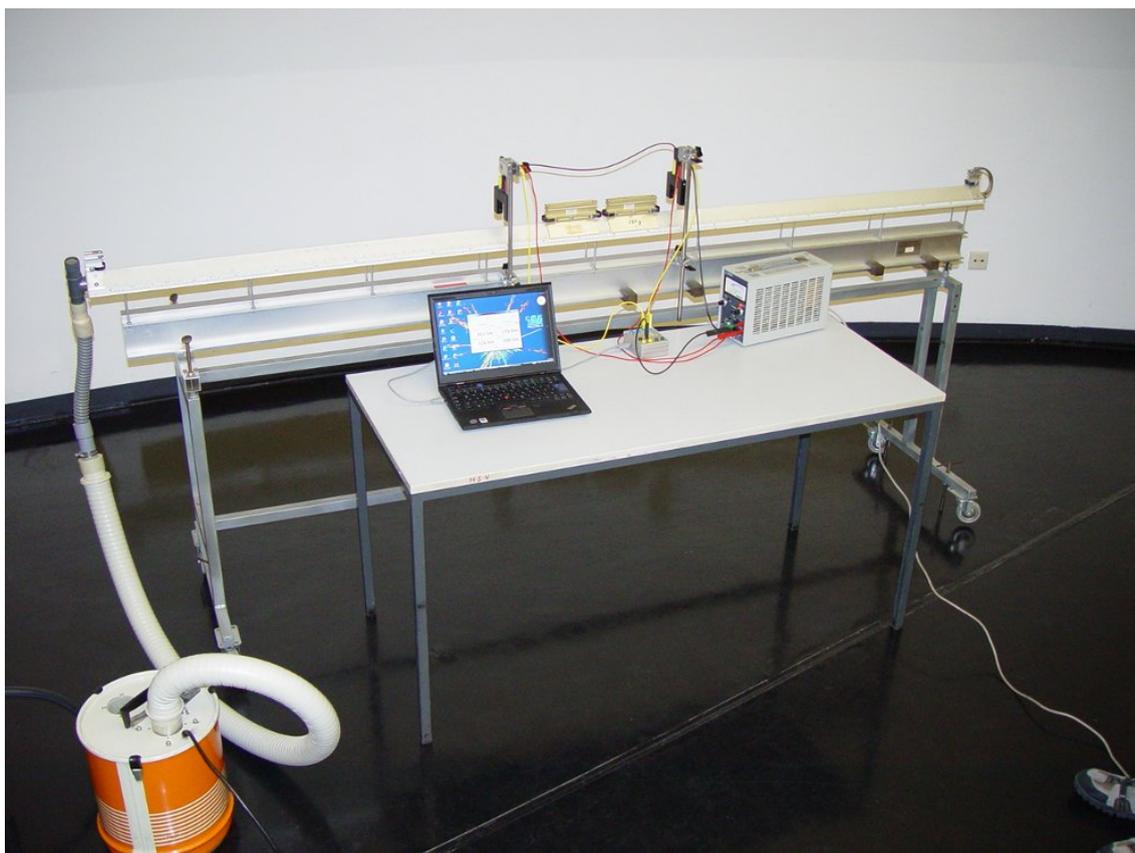


Abbildung 60: *Beispielaufbau der Luftkissenschiene*

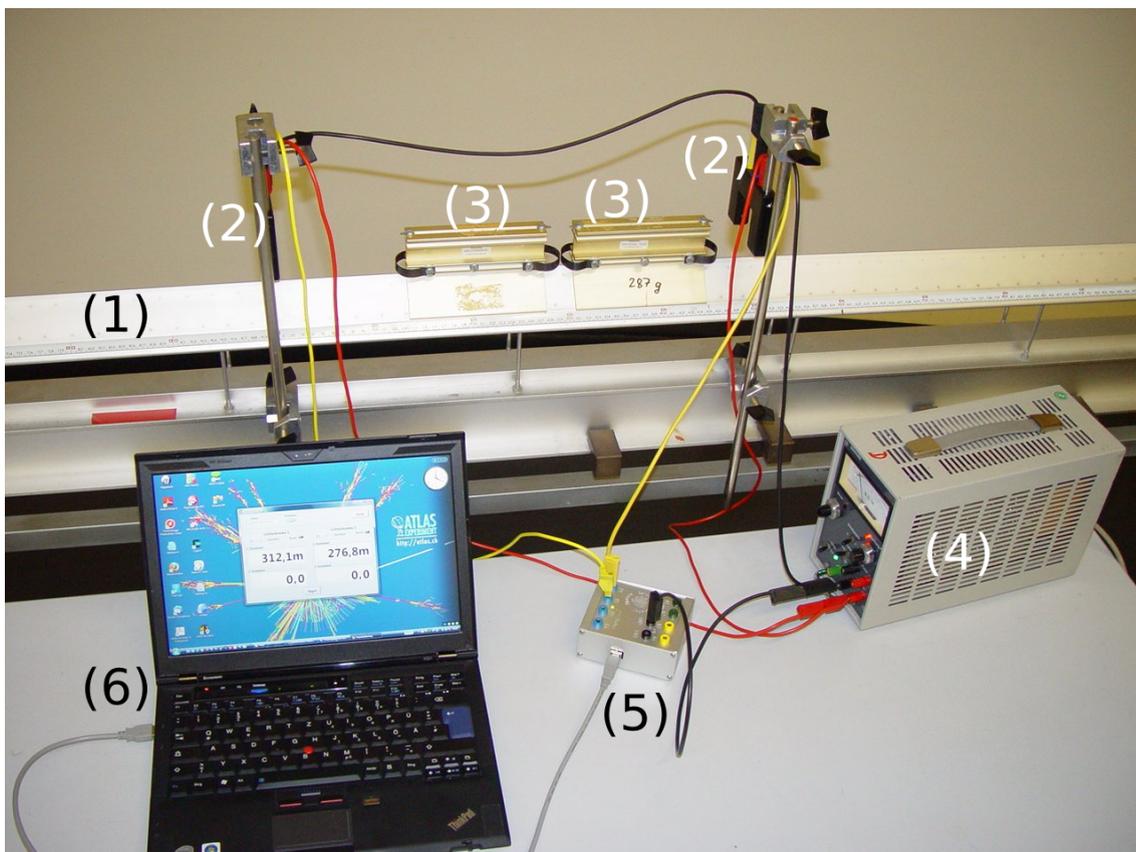


Abbildung 61: Anordnung der Lichtschranken an der Luftkissenschiene und Verbindung Lichtschranken \leftrightarrow USB-Box \leftrightarrow PC: (1) Luftkissenschiene, (2) Stativ mit Lichtschranke, (3) Schlitten, (4) Spannungsquelle, (5) USB-Box, (6) Laptop.

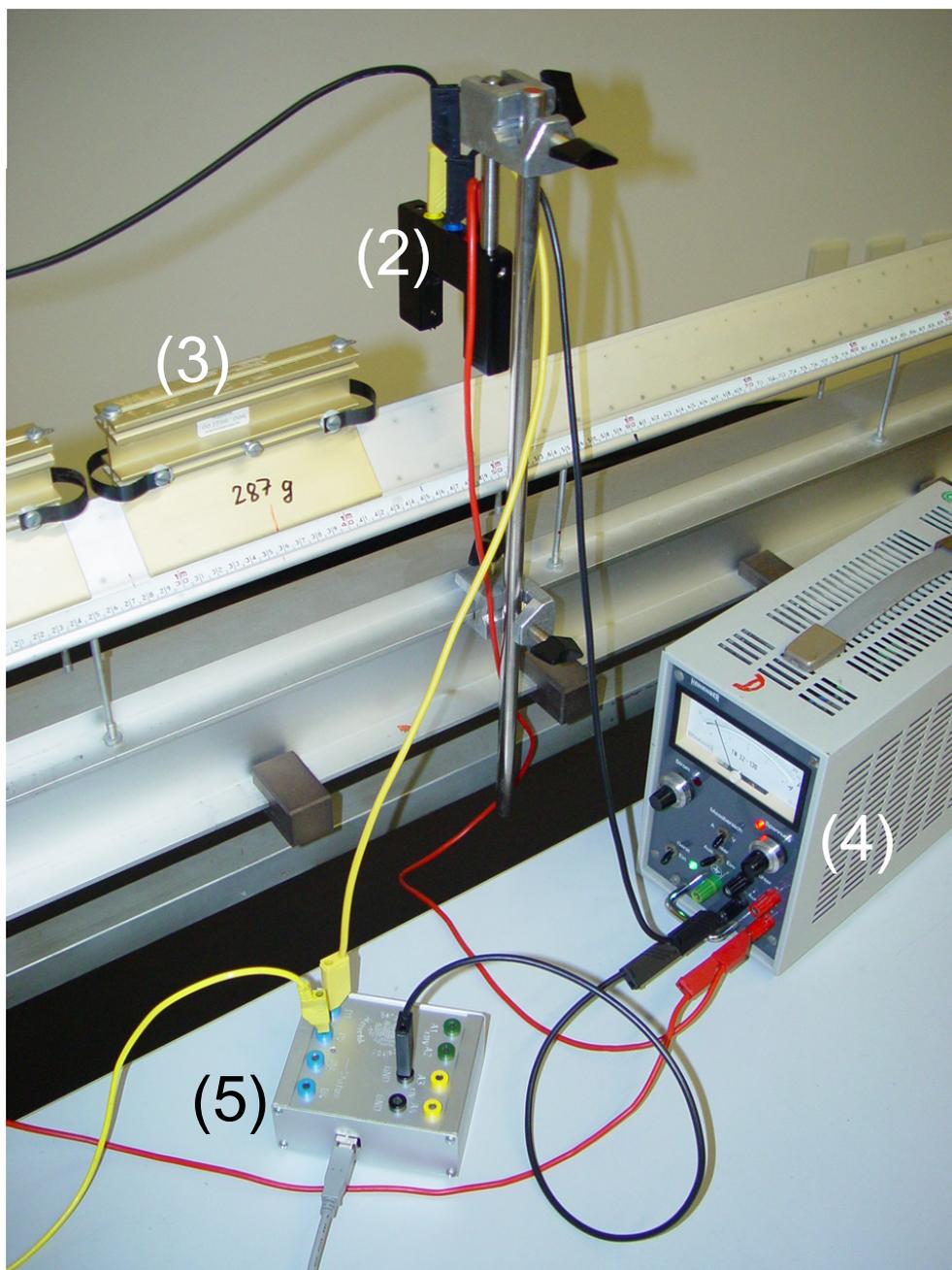


Abbildung 62: Verkabelung der Lichtschranken (2) mit der 5 V-Spannungsquelle (4) und der USB-Box (5); (3) Schlitten.

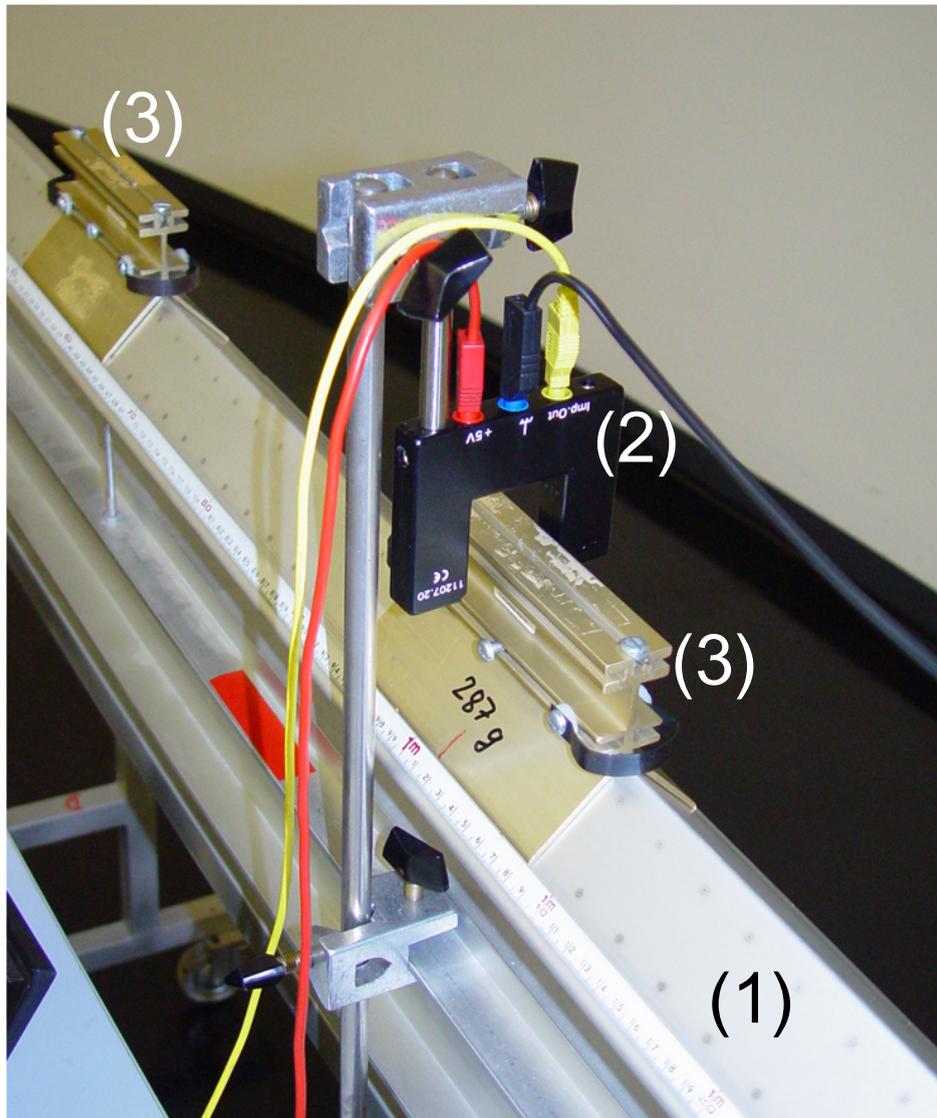


Abbildung 63: Lichtschrankenordnung – vergrößerte Ansicht: (1) Luftkissenschiene, (2) Lichtschranke, (3) Schlitten.

Für den Fall zweier identischer Gleitschlitten ($m_1 = m_2$) vereinfacht sich Gleichung (7.2) zu:

$$v_1^{(1)} + v_2^{(1)} = v_1^{(2)} + v_2^{(2)} \quad (7.3)$$

Für elastische Impulsübertragung bei den Stößen der Gleitschlitten folgt letztlich:

$$v_1^{(1)} = v_2^{(2)} \quad \wedge \quad v_2^{(1)} = v_1^{(2)} \quad (7.4)$$

Real vorhandene Reibungsverluste und nichtelastische Stoßkomponenten führen jedoch im Experiment zu geringen Abweichungen von diesem idealen Ergebnis, was aus der in Abb. 64 dargestellten Beispielaufnahme deutlich wird.

Wie in Abb. 59 dargestellt, wurden hierbei zwei Gleitschlitten von außen angestoßen, sodass sie durch die beiden Lichtschranken hindurchgehend ungefähr mittig zwischen den Lichtschranken elastisch zusammenstießen und erneut die Lichtschranken in entgegengesetzter Richtung passierten. In Abhängigkeit der Impulsüberträge beim Stoß wurden dabei die dargestellten Durchlaufzeiten registriert.

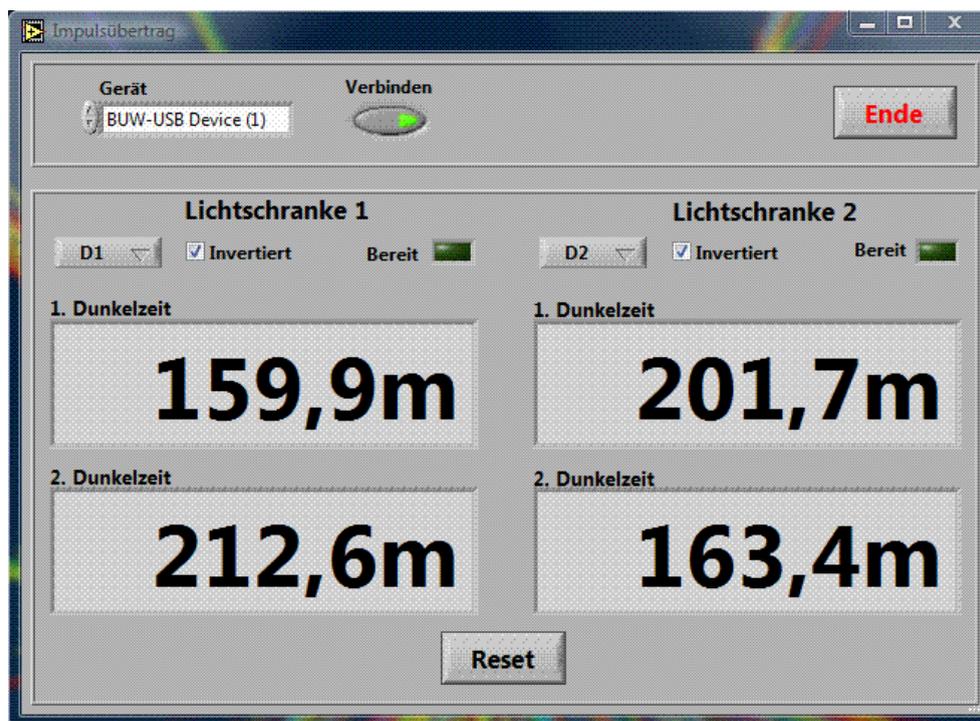


Abbildung 64: Gemessene Dunkelzeiten für die Lichtschrankendurchgänge der Schlitten: (o.l.) 1. Durchgang von Schlitten 1 bei Lichtschranke 1; (o.r.) 1. Durchgang von Schlitten 2 bei Lichtschranke 2; (u.l.) 2. Durchgang von Schlitten 1 bei Lichtschranke 1; (u.r.) 2. Durchgang von Schlitten 2 bei Lichtschranke 2 (Vgl. Abb. 58). Die beiden Kanäle D1, D2 sind hierbei auf invertiert geschaltet.

Gemäß $v = s/t$ mit der Gleitschrittenlänge $s = 0,14 \text{ m}$ spiegeln sich die Relation aus Gl. (7.1) und Gl. (7.4) in diesem Ergebnis wider:

$$\begin{aligned}
 & \overbrace{p_1^{(1)} + p_2^{(1)}}^{p_{\text{ges}}^{(1)}} = \overbrace{p_1^{(2)} + p_2^{(2)}}^{p_{\text{ges}}^{(2)}} \stackrel{!}{=} \text{const} \\
 \Leftrightarrow & \quad mv_1^{(1)} + mv_2^{(1)} = mv_1^{(2)} + mv_2^{(2)} \quad | \quad m = 0,287 \text{ kg} \\
 \Rightarrow & \quad 0,287 \text{ kg} \left(\frac{0,14 \text{ m}}{0,1599 \text{ s}} - \frac{0,14 \text{ m}}{0,2017 \text{ s}} \right) = 0,287 \text{ kg} \left(-\frac{0,14 \text{ m}}{0,2126 \text{ s}} + \frac{0,14 \text{ m}}{0,1634 \text{ s}} \right) \\
 \Rightarrow & \quad 0,287 \text{ kg} \left(0,8755 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 0,6941 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 0,287 \text{ kg} \left(-0,6585 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0,8568 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad (7.5) \\
 \Leftrightarrow & \quad 0,2513 \frac{\text{kg m}}{\text{s}} - 0,1992 \frac{\text{kg m}}{\text{s}} = -0,1889 \frac{\text{kg m}}{\text{s}} + 0,2459 \frac{\text{kg m}}{\text{s}} \\
 \Rightarrow & \quad 0,0521 \frac{\text{kg m}}{\text{s}} \approx 0,0570 \frac{\text{kg m}}{\text{s}} \approx \text{const} \quad (7.6)
 \end{aligned}$$

Die Vorzeichen hierbei ergeben sich aus Abb. 59 gemäß den Geschwindigkeitsrichtungen (*nach rechts* (+), *bzw. nach links* (-)). Aus den Werten in Gl (7.5) lässt sich Gl. (7.4) verifizieren:

$$v_1^{(1)} = 0,8755 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 0,8568 \frac{\text{m}}{\text{s}} = v_2^{(2)} \quad (7.7)$$

$$\text{und} \quad v_2^{(1)} = -0,6941 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx -0,6585 \frac{\text{m}}{\text{s}} = v_1^{(2)} \quad (7.8)$$

Dass die Geschwindigkeitswerte beim jeweils zweiten Lichtschrankendurchgang $v_{1,2}^{(2)}$ – *also nach dem Stoß* – geringer ausfallen, als beim ersten Durchgang $v_{1,2}^{(1)}$, lässt sich dadurch erklären, dass es aufgrund einer inelastischen Komponente beim Stoß der beiden Schlitten zu Impulsverlusten kommt, was in der Beschaffenheit der Metallfedern gründet. Zudem muss man auch bei der Luftkissenschiene mit – *zugegebenermaßen sehr geringen* – Reibungsverlusten rechnen. Eine nicht exakt horizontale Ausrichtung, sowie (produktions-, oder durch unsachgemäße Handhabung bedingte) Unebenheiten der Schiene wirken sich ebenfalls nachteilig auf Messungen aus.

Nach Gl. (7.6) ist unter Verlässlichkeit von Reibungs- und Inelastizitätseffekten der Gesamtimpuls des Systems nahezu erhalten. Man beachte, dass die Änderung des Gesamtimpulses p_{ges} nach dem Stoß lediglich $\Delta p := p_{\text{ges}}^{(2)} - p_{\text{ges}}^{(1)} \approx 0,0049 \frac{\text{kg m}}{\text{s}}$ beträgt, was in Bezug auf die einzelnen Schlittenimpulse in obigem Beispiel eine Änderung zwischen 1,9% und 2,5% bedeutet.