

# Mikrosekunden- stoppuhr

Zeitmessung für alle mechanischen  
Bewegungen zwischen Laserlichtschranken

Dr. Franz Raemy

30. Juni 2024



# 1 Überblick

In dieser Arbeit wird die elektronische Mikrosekunden-Zeitmessung zwischen zwei Laserstrahlen für den Freien Fall, für Bewegungen auf horizontalen und schiefen Ebenen und Laufzeitmessungen von Gegenständen durch einen einzigen Laserstrahl oder zwei Laserstrahlen beschrieben. Damit werden alle Bewegungsformen der Mechanik auf  $\pm 2$  Mikrosekunden genau messbar und die Geschwindigkeits-Experimente allgemein verständlich.

Zum Aufbau des Messsystems werden die vier folgenden Komponenten benötigt. Der ELV Frequency-Counter FC8000 wird als Impulszähler (Einstellung Event-Counter) verwendet. Die beiden Laserlichtschranken definieren ein Tor zwischen Start- und Stopp-Signal, welches die Mikrosekunden-Impulse zum Zähler durchlassen. Diese Mikrosekunden-Impulse werden vom DDS-Frequenzgenerator erzeugt. Das Tor und die Mikrosekunden-Impulse werden durch ein UND Gatter geschickt. Von dort werden sie auf den ELV-Zähler gegeben, der die Mikrosekunden zählt. Die Anzeige gibt die Zeit in Mikrosekunden an.

## 2 Die gemeinsamen Komponenten aller Zeitmessungen

### 2.1 Die Spannungsversorgung der beiden Laser und des Elektromagneten

Die Spannungsversorgung der Laserdioden wird mit 5 V-Spannungskonstanten Reglern gewährleistet. Im gleichen Gehäuse ist die Spannungsversorgung der Magnetfeldspule untergebracht. Diese Spannung respektive der Spulenstrom kann mit einem Potentiometer reguliert werden. Die Nützlichkeit dieser Möglichkeit wird später erklärt. Auf dem Gerät befindet sich auch der Umschalter des Magnetfeldstromes. Wird der freie Fall ausgelöst, dann soll auch das Magnetfeld umgepolt werden, um das Anwachsen des Permanentmagnetfeldes der Kugel zu verhindern.



Abb. 2.2.1

## 2.2 Der DDS Frequenzgenerator

Der DDS Frequenzgenerator erzeugt die höchst genaue Frequenz von 1 MHz für den Zähler. Diese Option wurde gewählt, um möglichst unterschiedlich genaue Frequenzgeneratoren mit TTL Signal wählen zu können. Hier wird ein Eigenbau-Frequenzgenerator (Abb. 2.2.1) verwendet.

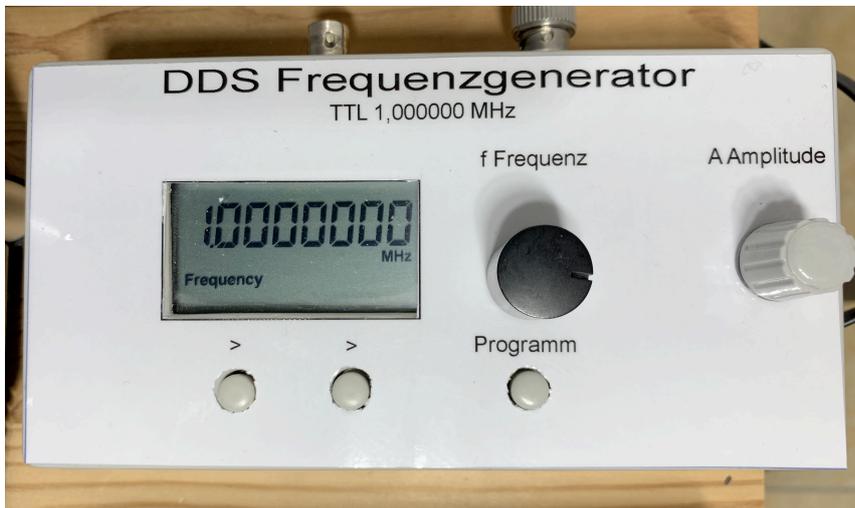


Abb. 2.2.1

## 2.3 Der Kabelbahnhof und die Signalaufbereitung

Der Kabelbahnhof besteht aus zwei Signaleingängen (Klinken-Stecker) der Start- und Stopp-Lichtschranke. Diese beiden Laser-Lichtschranken definieren den Torimpuls. Der DDS Frequenzgenerator stellt die Frequenz von 1 MHz für den Zähler bereit.

Der Umschalter auf dem Kabelbahnhof erlaubt die Wahl zwischen Messungen mit der Start- und Stopp-Laserlichtschranke oder der Zeitmessung mit nur dem Startsensor. In dieser Position misst die Start-Laserlichtschranke die Durchgangszeit während des Unterbruchs der Start-Lichtschranke, also der Dauer des Schattens. Fliegt ein Gegenstand der Dicke  $d$  in der Zeit  $t$  durch den Start-Laserstrahl, dann kann daraus die Geschwindigkeit  $v=d/t$  des Gegenstandes bestimmt werden. Die Elektronik zur Erzeugung des Torimpulses und des Ausgangssignals für den FC8000 Zähler geschieht im Kabelbahnhof.

Die Abbildung 2.2.1 zeigt die Aufsicht auf den Kabelbahnhof



Abbildung 2.2.1

## 2.4 Der ELV Frequency Counter FC8000

Für die Zählung der MHz TTL Rechteckimpulse wird das ELV Frequenzmessgerät verwendet. Das Gerät ist ein Bausatz, der teilbestückt von der ELV geliefert wird. Der Zusammenbau ist für einen Elektronikvertrauten aufgrund der hervorragenden Beschreibungen unproblematisch.

Das Gerät wird mit dem Kabelbahnhof verbunden. Es zählt die Impulse, die zwischen dem Start- und dem Stopp-Signal das Tor passiert haben. Der Bildschirm zeigt die Zeit in Mikrosekunden an. Der Fehler der Messungen beträgt maximal 2 Mikrosekunden.



Abbildung 2.4.1 Der FC8000

### **3 Das Experiment „Der freie Fall“**

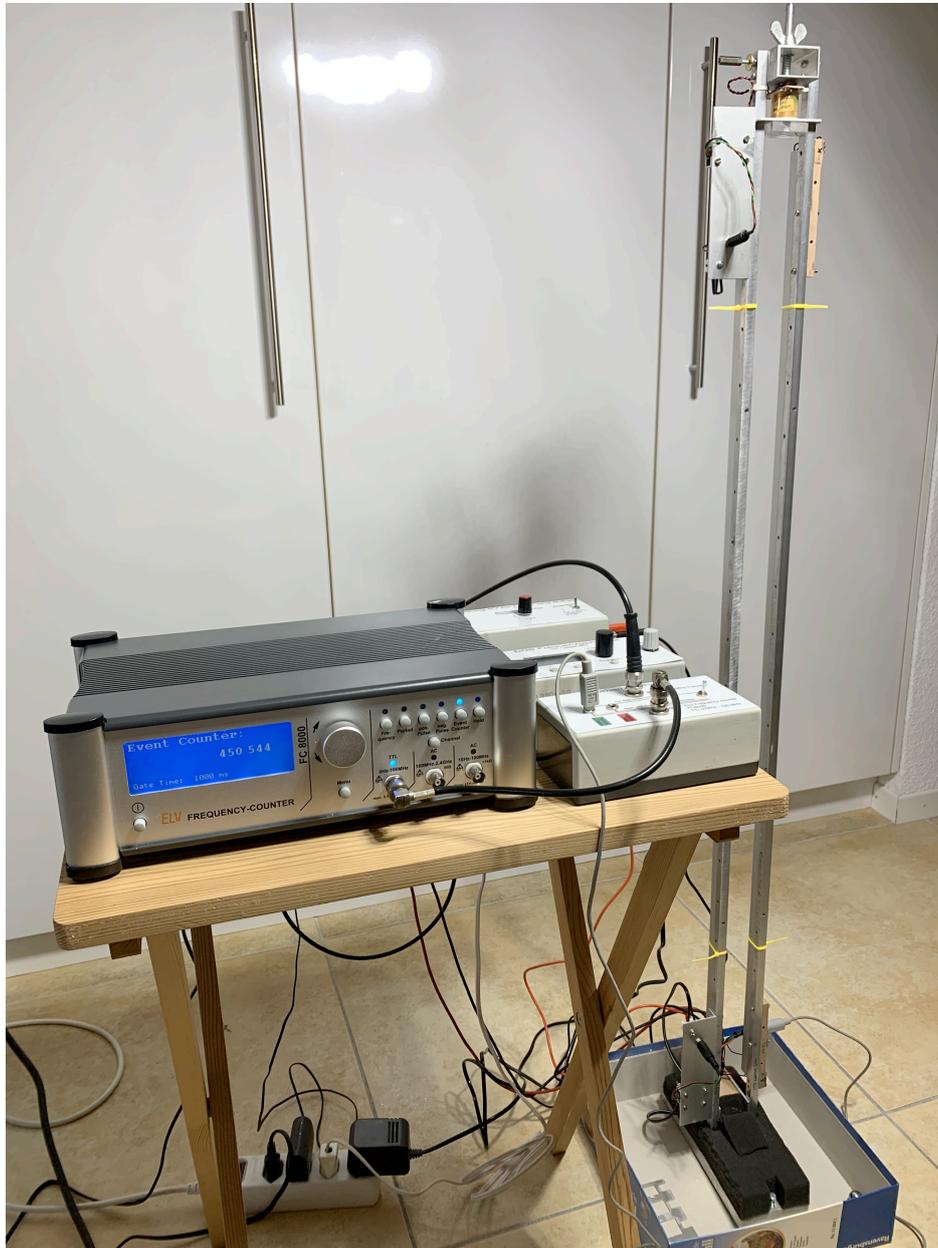
Das Projekt umfasst das Experiment des freien Falles. Dazu gehört eine mechanische Anordnung und eine Stoppuhr, so dass die Zeit, welche eine Masse braucht, um eine Höhendifferenz von einem Meter zu durchfallen, gemessen werden kann. Zur Zeitmessung wurde eine Schaltung entworfen, die auch als Frequenzmesser und als Ereigniszähler Anwendung finden kann.

#### **3.1 Bemerkungen zur Messtechnik**

Zum mechanischen Aufbau des Experimentes wird eine stabile Aluminiumhalterung gewählt, an deren oberen Ende ein Magnet befestigt ist, dessen Höhe sich durch eine Schraube justieren lässt. Die Höhe der Metallkugel wird mit der Schraube so eingestellt, dass die Start-Laserlichtschranke den Zählvorgang der Mikrosekunden gerade noch nicht auslöst. In diesem Experiment wird nicht wie üblich, das Abschalten des Magnetfeldes als Startsignal verwendet, sondern eine unabhängige Lichtschranke, die mit einer Reaktionszeit von einigen Nanosekunden ein exaktes Auslösen des Startsignals erlaubt. Zudem hat sich herausgestellt, dass der Fehler der Zeitmessung vor allem beim Start gross wird. Ein weiterer nicht unwesentlicher Vorteil, ist die eindeutige Feststellung der auslösenden Position der Masse. Der Messvorgang geschieht stets zwischen der Startposition und Stoppposition am Ort der Laserlichtschranken. Weiter spielt das Zurückhalten der Masse durch den Magneten eine wichtige Rolle. Das Magnetfeld wird nach der Positionierung der Metallkugel durch Regulierung des Spulenstromes möglichst klein gehalten, so dass die Kugel gerade noch nicht fällt. Bei der Auslösung des freien Falles wird die Spannung an der Spule umgepolt, um eine magnetische Fallverzögerung zu verhindern. Die Kugel sollte möglichst exakt durch die Mitte des Stopp-Laserstrahls verlaufen, sonst ist die Fallstrecke grösser und die Messzeit verglichen mit der Sollzeit zu lang. Um korrekt fallende Kugeln von Kugeln zu unterscheiden, die den Stopp-Sensor seitlich passieren könnten, wurde eine Lehre für alle Kugeln in ein Aluminiumblech geschnitten, die es erlaubt günstige von ungünstigen Ereignissen zu unterscheiden. Berührt die Kugel das Aluminiumblech, berücksichtigen wir das Ereignis nicht. Die Lotausrichtung des Experimentes geschieht durch drei Schrauben im Sockel.

### 3.2 Die Komponenten des Experimentes „Der freie Fall“

Als Halterung wird eine stabile Aluminiumkonstruktion gewählt, um die Messung beim freien Fall nicht durch störende Magnetfelder zu beeinflussen. Die folgende Abbildung zeigt den gesamten mechanischen Aufbau des Experimentes „Der freie Fall“.



### **3.3 Die Elektronik zur Verarbeitung der Mikrosekunden-Impulse**

Zwischen dem Start- und dem Stopp-Lichtsensoren sollen die Mikrosekunden durch ein so definiertes Tor laufen können. Die Abbildung 3.3.1 zeigt die Schaltung, welche am Ausgang die zu zählenden Mikrosekunden-Impulse bereitstellt wenn die elektronische Schaltung freigeschaltet ist. Die zu zählenden Mikrosekunden-Impulse werden auf den TTL-Eingang des FC8000 gegeben.



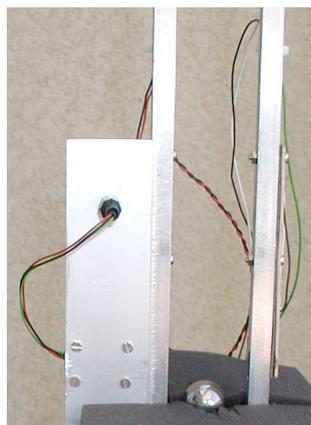
Abb. 3.3.1

### **3.4 Die elektrischen Lichtschranken aus Laser und Fotodioden**

Die elektrischen Lichtsensoren und Lichtquellen sind im Start- und Zielbereich angeordnet. Die Länge der so definierten maximalen Fallstrecke ist ein Meter. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den Start- und den Stopp-Lichtsensoren.



Laser, Startsensor, Kugel  
und Elektromagnet



Stopsensor

Die Funktion des Start- und des Stopp-Sensors sind gleich. Wird der Laser-Lichtstrahl durch die fallende Masse unterbrochen, dann wird der Sensor hochohmig, das heißt: man erhält eine positive Flanke, die von der Elektronik jeweils als Start- oder als Stopp-Signal verwertet wird. Diese beiden Signale definieren die Torzeit.

### 3.5 Das Messgerät FC8000

Das Frequenz-Messgerät FC8000 ist ein Bausatz des ELV. Viele der elektronischen Miniaturkomponenten sind bereits bei der Lieferung auf der Platine verbaut. Der Zusammenbau ist dank der hervorragenden Beschreibung problemlos. Die folgende Abbildung zeigt das vielseitige Messgerät. Der ELV Frequency-Counter FC8000 erlaubt auch Langzeitmessungen mit einer Genauigkeit von  $\pm 2$  Mikrosekunden.



Abb.3.5.1 ELV Frequency-Counter FC8000



Abb. 3.5.2 Stromversorgung, DDS-Frequenznormal, Kabelbahnhof mit Signalaufbereitung

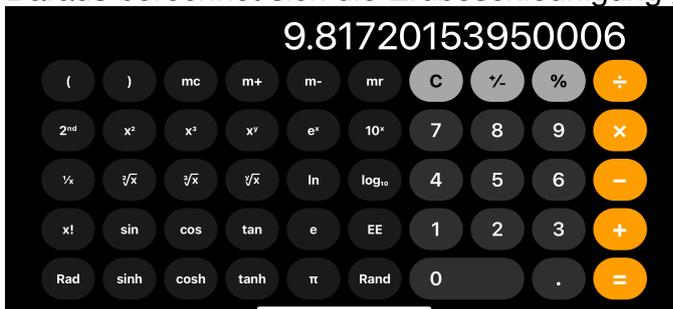
### 3.6 Die Messung der Fallzeit und Bestimmung der Erdbeschleunigung $g$

Aus der Zeitmessung  $t$  zwischen Start- und Stopp-Laserlichtschranke, die sich in einer Distanz von 1 Meter befinden, wird die Gravitationsbeschleunigung  $g$  der Erde bestimmt.



Abb. 3.6.1 Die Frequenzzählung ergibt  $451358 \mu s$ .

Daraus berechnet sich die Erdbeschleunigung  $g$  zu;



Hier die Formel zur Berechnung von  $g$ :

$$h = \frac{1}{2} g \cdot t^2 \quad \Rightarrow \quad g = \frac{2h}{t^2}$$

$$t = 451358 \mu s \quad \Rightarrow \quad \boxed{g = 9,817 \frac{m}{s^2}}$$

## 4 Das Pendel-Experiment

### 4.1 Der Aufbau des Pendel-Experimentes

Die Abbildung 4.1.1 zeigt den Aufbau des Pendel-Experimentes. Links befinden sich die Laser, wobei hier nur die vordere Start-Laser-Lichtschranke benutzt wird. In der Mitte befinden sich das Pendel und der Frequenzzähler FC8000. Rechts sind die drei grauen Gehäuse mit der Stromversorgung für die Laser-Dioden, das DDS-Frequenznormal für die 1MHz-Frequenz und im Vordergrund der Kabelbahnhof mit der Signalverarbeitungselektronik der Signale aus den beiden BPW34 Fotodioden rechts aussen.



Abb. 4.1.1

Hier werden drei Messungen der Kugelgeschwindigkeit gezeigt und mit dem theoretischen Wert verglichen.

#### 4.1.1 Die erste Geschwindigkeitsmessung

Das Pendel hat eine Länge von 38,5 cm. Die Durchlaufzeit der Kugel durch den Start-Laserstrahl ist  $t$ . Der Durchmesser der Kugel  $D$  ist 1,38 cm. Im Falle des Pendels wandelt sich die potentielle Energie in kinetische Energie um. Die Kugel selber hat keine Rotationsenergie. Das wird sich beim Experiment mit einer rollenden Kugel auf einer Schiene grundlegend ändern.

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} = E_{pot} = mgh \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,385 m}$$

$$\boxed{v = 2,75 \frac{m}{s}}$$

Aus dem Kugeldurchmesser und der gemessenen Durchlaufzeit durch den Laserstrahl folgt:

$$v = \frac{D}{t} = \frac{0,0138 m}{4978 \cdot 10^{-6} s} \quad \Rightarrow \quad \boxed{v = 2,77 \frac{m}{s}}$$

### 4.1.2 Die zweite Geschwindigkeitsmessung

Die Pendellänge ist gleich 38,5cm, die Durchlaufzeit der Kugel durch den Start-Laserstrahl ist  $t$  und der Durchmesser der Kugel  $D$  ist 1,38 cm.

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} = E_{pot} = mgh \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,385 m}$$

$$v = 2,75 \frac{m}{s^2}$$

Aus dem Kugeldurchmesser und der gemessenen Durchlaufzeit durch den Laserstrahl folgt:

$$v = \frac{D}{t} = \frac{0,0138 m}{5008 \cdot 10^{-6} s} \quad \Rightarrow \quad v = 2,77 \frac{m}{s}$$

### 4.1.3 Die dritte Geschwindigkeitsmessung

Aus dem Kugeldurchmesser und der gemessenen Durchlaufzeit  $t = 4946 \cdot 10^{-6} s$  durch den Laserstrahl folgt:

$$v = \frac{D}{t} = \frac{0,0138 m}{5578 \cdot 10^{-6} s} \quad \Rightarrow \quad v = 247,4 \frac{cm}{s}$$

### 4.1.4 Die Verbesserte Startmechanik gleich wie beim freien Fall

Das folgende Bild zeigt die Pendelkugel angehängt am Elektromagneten. Die Messung für eine Pendellänge von  $h=31,2$  cm, einem Kugeldurchmesser  $d=1,38$  cm und der Durchlaufzeit  $t = 5589 \mu s$  ergibt eine Geschwindigkeit der Kugel im tiefsten Punkt von:

$$v_{messung} = \frac{1,38 cm}{5589 \mu s} = 247,4 \frac{cm}{s}$$

Der theoretische Wert aus der Energieerhaltung mit der Pendellänge  $h$  ergibt:

$$v_{theo} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,312 m} = 247,4 \frac{cm}{s}$$

Die Theorie und das Experiment sind in perfekter Übereinstimmung.



Abb. 4.1.4.1

## 5 Die Kugel auf schiefer U-Schiene unter Berücksichtigung der Rotationsenergie

### 5.1 Die Energieumwandlung

Die Abb. 5.1.1 zeigt die Kugelbahn. Die Kugel besitzt sowohl Rotations- wie Translationsenergie.



Abb. 5.1.1

Die potenzielle Energie wird einerseits in eine kinetische Energie der Kugel längs der Bahn und in eine Rotationsenergie der Kugel mit dem Trägheitsmoment  $I$  umgewandelt:

$$E_{pot} = mgh = E_{kin} + E_{rot} = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{I \cdot \omega^2}{2}$$

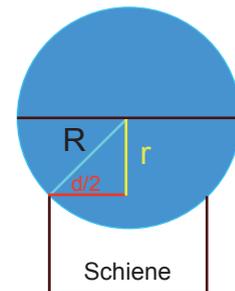
wobei

$$I = \frac{2}{5} m \cdot R^2 \quad \text{und} \quad v = \omega \cdot r \quad \text{und} \quad r^2 = R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$\Rightarrow mgh = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{I \cdot \omega^2}{2} = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} m \cdot R^2 \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$\Rightarrow gh = \frac{v^2}{2} + \frac{1}{5} R^2 \cdot \frac{v^2}{r} = v^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{5} \cdot \frac{R^2}{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right)$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{g \cdot h}{\frac{1}{2} + \frac{1}{5} \cdot \frac{R^2}{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}}$$



## 5.2 Vergleich der theoretischen mit der experimentellen Geschwindigkeit

Der theoretische Wert der Geschwindigkeit der Kugel auf der schiefen Schiene beträgt mit

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2} \quad d = 0,0084 m$$
$$h_1 = 25,7 cm \quad h_2 = 20,8 cm \quad \Rightarrow \quad h = 4,9 cm$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{v_{theoretisch} = 0,787 \frac{m}{s}}$$

Die experimentellen Werte der Geschwindigkeit ergeben sich aus der Zeitmessung gemäss der Formel  $v_{mess i} = \frac{2R}{t_i}$ . Die Distanz  $2R$  ist der Kugeldurchmesser, der beim Durchgang durch den Laserstrahl von der Kugel zurückgelegt wird.

$$t_1 = 20483 \mu s \quad \Rightarrow \quad \boxed{v_{mess 1} = 0,781 \frac{m}{s}}$$

$$t_2 = 20181 \mu s \quad \Rightarrow \quad \boxed{v_{mess 2} = 0,793 \frac{m}{s}}$$

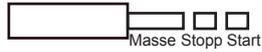
$$t_3 = 20154 \mu s \quad \Rightarrow \quad \boxed{v_{mess 3} = 0,794 \frac{m}{s}}$$

$$t_4 = 20103 \mu s \quad \Rightarrow \quad \boxed{v_{mess 4} = 0,796 \frac{m}{s}}$$

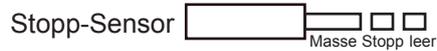
## 6 Anhang

### 6.1 Die Klinken-Steckverbinder auf dem Kabelbahnhof

Die Belegung des Klinken-Steckers im Experiment „Der freie Fall“ zeigt, dass das Start und Stopp-Signal auf einem Kabel übertragen werden.



Die Belegung der beiden Klinken-Stecker in Experimenten mit Start- und Stopp-Sensor zeigt, dass die beiden Signale des Start- und des Stopp-Sensors auf zwei separaten Klinken-Steckern übertragen werden.



### 6.2 Die BPW34 Fotodiode

