



## **Aufzeichnung, Visualisierung und Auswertung der gleichmäßig beschleunigten Bewegungen mit Richtungsumkehr auf einer Rollenfahrbahn mit dem VL53L0X-Sensor und Messwerterfassungssystem PhyPiDAQ**



*Abb.1 Die Grundidee des Versuchs bezieht sich auf die Untersuchung der Bewegung eines Fahrbahnwagens auf einer geneigten Rollenfahrbahn;*

In diesem Versuch werden die Fahrzeiten und die Wegstrecken eines mit einer Stoßfeder vorgesehenen Experimentierwagens aufgezeichnet. Er wird auf einer geneigten Fahrbahn in einer angemessenen Entfernung vom Laser-Entfernungssensor losgelassen. Der Körper rollt beschleunigt hinab und stößt gegen ein Hindernis am unteren Ende der Fahrbahn. Nach dem Stoß bewegt sich der Messwagen abgebremst in entgegengesetzter Richtung auf der schiefen Ebene hinauf bis er kurz zum Stillstand kommt, danach fährt er wieder beschleunigt herunter, wird am Endpuffer reflektiert und auf diese Weise pendelt er mehrfach hin und her, wie im Video <https://www.youtube.com/watch?v=pnboOmWibMs> dargestellt.

Hauptziele:

- Aufzeichnung, Visualisierung und Auswertung gleichmäßig beschleunigter Bewegungen mit Richtungsumkehr auf einer Rollenfahrbahn mit dem VL53L0X-Sensor und Messwerterfassungssystem PhyPiDAQ;
- Ermittlung des Impulses, und der Impulsänderung, Einführung der dynamischen Definition der Kraft;
- Bestätigung der *Newtonschen* Axiomen;
- Untersuchung der Rollreibung und Bestimmung des Rollreibungskoeffizienten;
- Untersuchung der kinetischen, der potenziellen und der gesamten Energie des Körpers während der Bewegung;
- Nutzung der Messdaten im Mathematikunterricht zu funktionalen Zusammenhängen, Anbindung des Mathematikunterrichtes an die Realität;



## Fragen und Aufgaben

### I. Aufbau des Versuchs

- I.1 Entwerfen Sie die Experimentieranordnung des Versuchs mit den notwendigen Bauteilen für die Durchführung und Messwerterfassung basiert auf dem Raspberry Pi und auf dem VL53L0X-Distanzsensord;
- I.2 In eine Tabelle tragen Sie alle Bauteile ein. Beschreiben Sie die Rolle jedes Bauteils für die Durchführung des Versuchs;
- I.3 Besprechen Sie mit Ihrem Partner die Beschaltung und die Pinbelegung des VL53L0X-Distanzsensord;
- I.4 Falls Sie noch keine Erfahrung haben, schauen Sie die untere Skizze und klären Sie die Beschaltung des Sensors;
- I.5 Erstellen Sie selber den unten dargestellten Schaltplan mit der freien Software *Fritzing*;

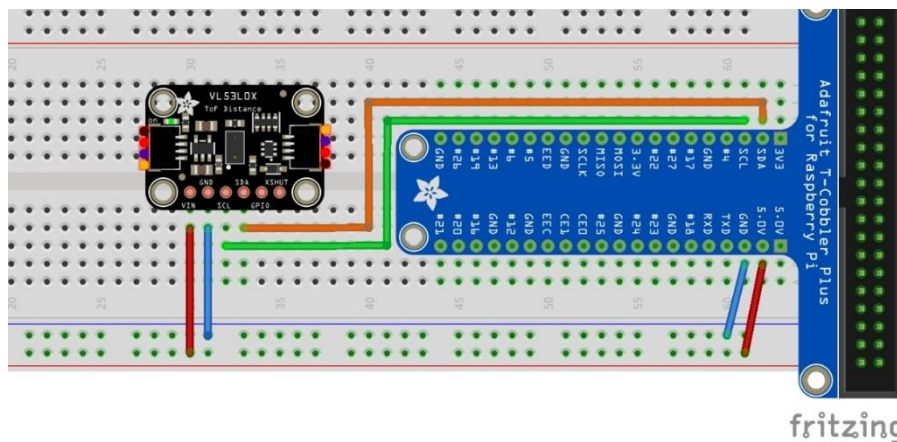


Abb. 2. Beschaltung des VL53L0X-Distanzsensord

- I.6 Wie erfolgt die Messdatenübertragung über die serielle Datenleitung (SDA) und serielle Taktleitung (SCL) der I2C-Schnittsstelle?

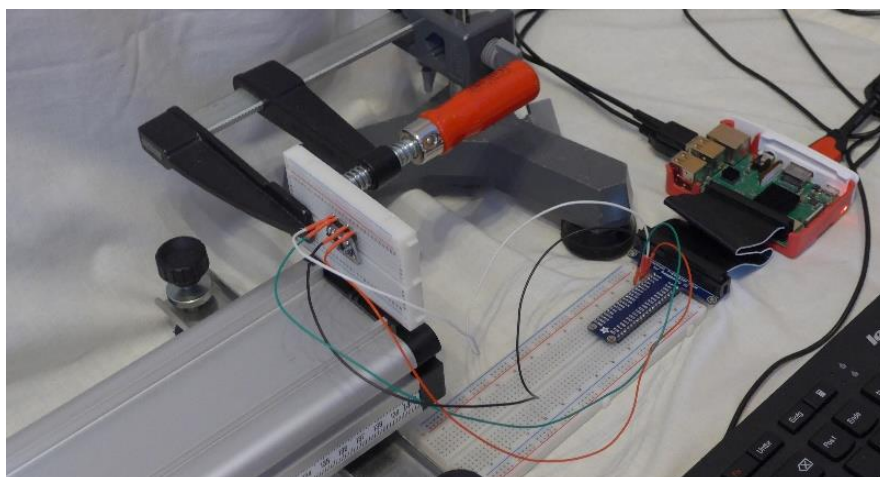


Abb. 3. Aufbau des Steckboards mit dem VL53L0X-Distanzsensord auf der Fahrbahnschiene



II.7 Überprüfen/Vergleichen Sie Ihre Experimentieranordnung mit dem dargestellten Versuchsaufbau und suchen Sie nach verbesserten Möglichkeiten für die Befestigung des Sensors, sodass der Laser-Strahl senkrecht auf dem Reflektor des Wagens fällt;

II. Nachdem die Experimentieranordnung vollständig fertig ist, muss man den Versuch in **PhyPiDAQ- Messwerterfassungssystem konfigurieren**.

II.1 Schauen Sie das folgende Video zur .daq-Fonfiguration des Versuchs, und zur .yaml-Konfiguration des Sensors an. Besprechen Sie mit Ihren Mitschülern alle diesen Schritten. <https://www.youtube.com/watch?v=B1pJn7edW5A>

II.2 Wie werden die Befehle zum Aufzeichnen, Visualisieren und Speichern der Messdaten im Hauptmenü des PhyPiDAQ-Fensters aktiviert und ergänzt?

II.3 Wie wird die .yaml-Konfiguration des VL53L0X-Distanzmesssensor hochgeladen? Welche Merkmale soll man bei diesem Sensor eingeben?

II.4 Was bewirkt der Befehl ChanLimits im Messfenster des PhyPiDAQ-Messwerterfassungssystem?

II.5 Wie werden die physikalischen Größen mit ihren Maßeinheiten in die .daq-Konfiguration des Versuchs eingegeben?

II.6 Mit welchen Befehlen lassen sich die Messdaten in .csv-Format für weitere Auswertungen speichern?

II.7 Wie kann man die eingaben nach der ersten Messung verbessern?

II.8 Wo befindet sich die Datei mit den entsprechenden Konfigurationen und Messwerten?

Dokumentieren Sie alle vorgenommenen Schritte für eine erfolgreiche Konfiguration;

Ist die Konfiguration des Versuchs fertig, kann man die erste Messung beginne. Dazu drucken Sie *StartRun* unten rechts auf dem Hauptfenster des PhyPiDAQ- Messwerterfassungssystems:

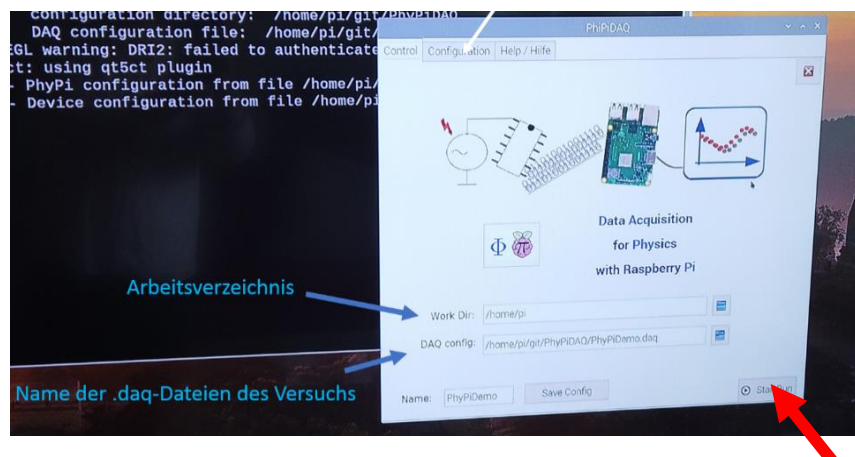


Abb. 4. Mit StartRun startet man die Messung



Während der Bewegung des Fahrbahnwagens zeichnet der VL53L0X- Distanzmesssensor mehrmals pro Sekunde die Entfernung des Experimentierwagens auf, welche als Zeit-Weg-Diagramm in Echtzeit im Diagramm-Fenster des PhyPiDAQ-Programms dargestellt wird.

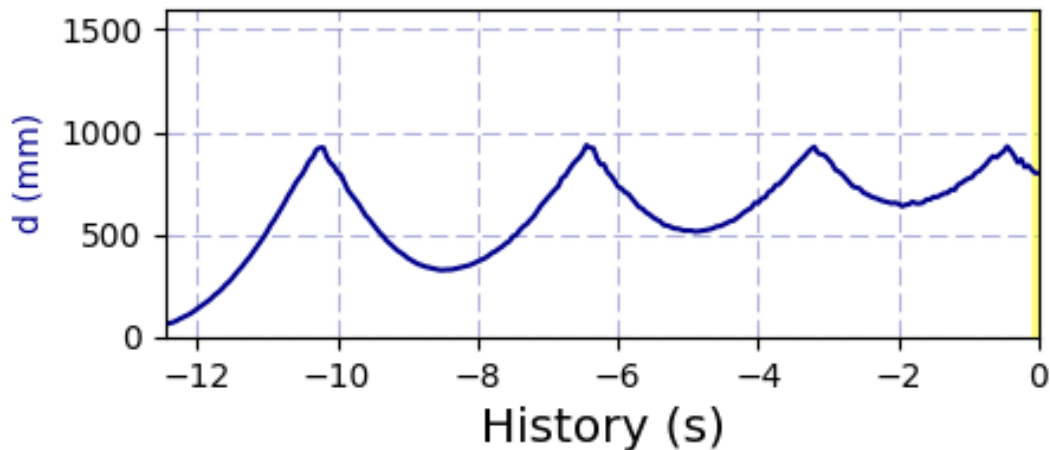


Abb.5 Das Zeit-Weg-Diagramm mit Richtungsumkehr wird aufgezeichnet und im PhyPiDAQ-Diagrammfenster in Echtzeit dargestellt

Aus dem Zeit-Weg-Diagramm, kann man relevante Informationen ermitteln, wie z.B. die Position des Körpers zu einem bestimmten Zeitpunkt, den zurückgelegten Weg in einem bestimmten Zeitintervall durch Differenzenbildung, Richtung der Bewegung, Schnelligkeit und Geschwindigkeit. Ausgehend von den Messwerten und deren zeitlichen Verlauf werden Größen wie z.B. Impuls, Kraftstoß, Kraft, Beschleunigung, Reibung, kinetische und potenzielle Energie zeichnerisch und rechnerisch untersucht.

### III. Fragen und Aufgaben zu physikalischen Messungen

#### III.1 Einfache Fragen zum Zeit-Weg-Diagramm

Die Messdaten wurden in .csv-Format gespeichert, und mit Tabellenkalkulationsprogrammen, wie z.B. in Excel, weiter erarbeitet. Das entstandene Zeit-Weg-Diagramm kann man mit dem in PhyPiDAQ-Fenster in Echtzeit dargestellten Diagramm vergleichen. Die Bewegung des Objektes zwischen dem Fuß und dem höchsten erreichten Punkt auf der geneigten Rollenfahrban wurden entsprechend bezeichnet.

- III.1.1. Beschreiben Sie die Fahrt des Objekts in den einzelnen Zeitabschnitten.
- III.1.2. Wann erreicht der Fahrbahnwagen den unteren Endpuffer, bzw. den höchsten Punkt auf der geneigten Schiene? Lesen Sie diese Werte auf dem in PhyPiDAQ-Fenster durch die Schalttaste `SaveGraph` gespeicherten Bild des realen Vorgangs, sowie in der .csv-Format Wertetabelle ab.
- III.1.3. Wie lange dauert die Bewegung auf jedem Abschnitt? Welche Strecke wird dabei zurückgelegt?
- III.1.4. Welche Strecke wird insgesamt bis zum Stillstand zurückgelegt?
- III.1.5. In welcher Richtung in Bezug auf den Bewegungssensor bewegt sich der Körper auf jedem Abschnitt?

### III.1.6. Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Graphen der beschleunigten bzw. der verzögerten Bewegung sind zu erkennen?

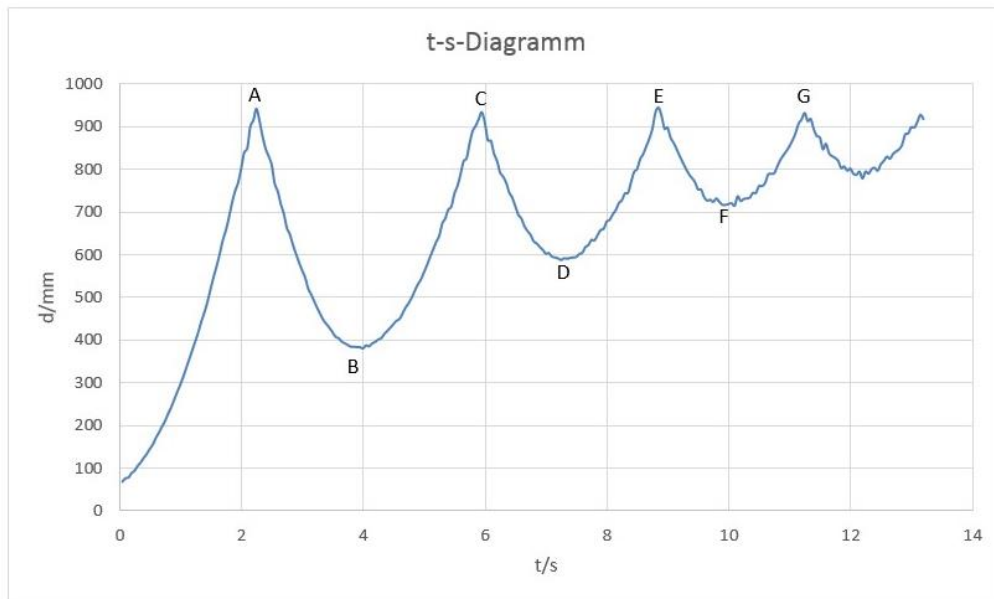


Abb.6 Das aus den in .csv-Format gespeicherten Messdaten entstandene Zeit-Weg-Diagramm des Fahrbahnwagens

## III.2 Fragen zur Momentangeschwindigkeit, Schnelligkeit und Geschwindigkeitsänderung

Die Geschwindigkeit des Fahrbahnwagens setzt sich zusammen aus deren Schnelligkeit und Bewegungsrichtung. Sie kann durch einen Vektor bzw. einen Pfeil dargestellt werden. Seine Richtung gibt die Bewegungsrichtung, sein Betrag bzw. seine Länge gibt das Tempo der Bewegung an.

III.2.1 Zeichnen Sie qualitativ den Vektor der Momentangeschwindigkeit des Fahrbahnwagens in der folgenden Abbildung, falls er sich vom Sensor wegbewegt.

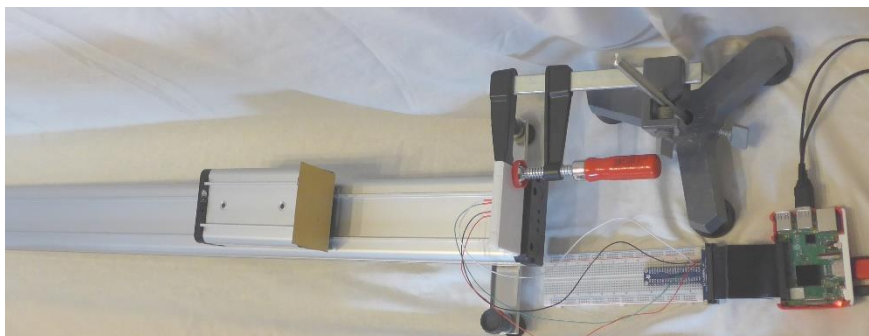


Abb.7 Der Fahrbahnwagen rollt die schiefe Ebene hinab

III.2.2 Geben Sie den Ort auf der Schiene an, wo sich die Richtung der Geschwindigkeit ändert. Erklären Sie die Ursache des Geschehens.



III.2.3 Gemäß den Bezeichnungen in der Abb.6, klären Sie wo und wann ist die Momentangeschwindigkeit des Messwagens Null, bzw. maximal.

III.2.4 Geben Sie begründen an, ob das Objekt auf der Strecke AB, bzw. BC schneller werdend oder langsamer werdend ist.

III.2.5 Geben Sie die Definitionsformel der durchschnittlichen Geschwindigkeit zwischen zwei Punkten der zurückgelegten Strecke an. Wählen Sie zwei Wertepaare in der .csv-Tabelle entlang der Strecke AB, und berechnen Sie die Durchschnittsgeschwindigkeit.

III.2.6 Wie kann man die Durchschnittsgeschwindigkeit im Zeit-Weg-Diagramm grafisch darstellen?

III.2.7 Ausgehend von der Durchschnittsgeschwindigkeit kann man grafisch die Momentangeschwindigkeit bestimmen. Erklären Sie das zugehörige Verfahren, sowie den mathematischen Zusammenhang.

III.2.8 Zeichnen Sie die Tangenten an mehreren Punkten des Zeit-Weg-Diagramms auf der Strecke AB. Was kann man über die Steigung dieser Tangenten sagen? Interpretieren Sie den Werteverlauf der Steigung in Zusammenhang mit der Art der Bewegung des Objektes. Wiederholen Sie dieses Verfahren für die Strecke BC.

III.2.9 Geben Sie Orte und Zeitpunkte an, wo der Körper gleiche Schnelligkeit hat, aber die Geschwindigkeit unterschiedliche Richtungen hat. Erläutern Sie fachsprachlich Ihr Vorgehen.

III.2.10 Die Momentangeschwindigkeit  $v$  zum Zeitpunkt  $t$  ist die Intervallgeschwindigkeit  $\Delta v$  in einem möglichst kleinen Zeitintervall  $\Delta t$ , das um den Zeitpunkt  $t$  gelegt wird. Wie kann man die Momentangeschwindigkeit um einen Zeitpunkt  $t$  mit Hilfe der in .csv-Format gespeicherten Messdaten annähernd bestimmen?

III.2.11 Mathematisch betrachtet ist die Momentangeschwindigkeit die erste Ableitung des Weges  $s(t)$  nach der Zeit  $t$ . Falls die Funktion  $s(t)$  nicht bekannt ist, kann man als Näherung der gesuchten Momentangeschwindigkeit durch die numerische Ableitung ermitteln. Geben Sie den kleinsten Wert des Zeitintervalls  $\Delta t$ , den man durch das Messen mit dem Raspberry Pi einstellen kann.

III.2.12 Die Datei mit den Messdaten steht Ihnen unter der Website <http://www.hw.pf.bw.schule.de/joomla/index.php/bildungsangebote/berufsschule?id=256> zur Verfügung. In der folgenden Abbildung wird gezeigt, wie man durch Iteration die Werte der Momentangeschwindigkeit annähernd bestimmen kann. Die Idee ist, dass die gesamte Bewegung des Körpers aus vielen kleinen Intervallen  $\Delta t = 0,05s$  zusammengesetzt wird. Die sich ändernde Größen für kurzes Zeitintervall  $\Delta t$  werden als konstant angenommen. Erst beim Übergang zum nächsten Intervall werden die veränderten Werte berücksichtigt. Nachdem Sie die Formel zur Berechnung der Geschwindigkeit in der D5-Zelle eingegeben haben, ziehen Sie das rechte Eck dieser Zelle nach unten, um alle Werte der Geschwindigkeit zu bestimmen.

Mit den gefundenen Werten stellen Sie das Zeit-Geschwindigkeit-Diagramm grafisch dar, und interpretieren Sie dieses.



	A	B	C	D	E	F
1	# PhyPiDAQ Data recorder 200616-1516					
2	# logging interval 0.05					
3	# d:(mm)		t in s	d in mm	v in mm/s	
4	69		0.05	69		
5	77		0.1	77	= (D5-D4)/0.05	
6	79		0.15	79		
7	89		0.2	89		
8	95		0.25	95		
9	106		0.3	106		

Abb.8 Numerisches Verfahren zur Bestimmung der Momentangeschwindigkeit

III.2.13 Vergleichen Sie die Geschwindigkeiten vor und nach dem jeden Stoß. Sind die Schnelligkeiten gleichgroß beim Stoß in A, B und C?

III.2.14 Nun wird der Stoß des Experimentierwagens am unteren Hindernis der Schiene betrachtet. Die Geschwindigkeit nach dem Stoß setzt sich durch Vektoraddition aus der Geschwindigkeit vor dem Stoß und der Zusatzgeschwindigkeit zusammen. Zeichnen Sie qualitativ den Vektor der Zusatzgeschwindigkeit.

III.2.15 Die Steigung des t-s-Diagramm ändert sich ständig. Welche Ursache hat diese Änderung?

### III.3 Fragen zum Thema Impuls, Impulsänderung und Kraft

III.3.1 Rollt der Experimentierwagen die schiefe Fahrbahn hinab, so nimmt seine Momentangeschwindigkeit zu. Beschreiben Sie die Ursache der immer weiter Vergrößerung der Momentangeschwindigkeit, sowie der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$  des Objektes.

III.3.2 Wiederholen Sie die Messungen für einen größeren Neigungswinkel der Schiene. Beschreiben Sie die Änderung der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$  des Messwagens für dasselbe Zeitintervall.

III.3.3 Vergleichen Sie die Werte der Momentangeschwindigkeit nach demselben Zeitintervall bei der Änderung des Neigungswinkels, indem Sie die Steigungen der Tangenten an den entsprechenden Zeitpunkten in den Zeit-Weg-Diagrammen ermitteln.

III.3.4 Wie hängt die Geschwindigkeitsänderung von der Stärke der Einwirkung und von ihrer Dauer ab?



III.3.5 Zeichnen Sie alle auf den Fahrbahnwagen wirkenden Kräfte ein. Ergänzen Sie eine Kräftezerlegung parallel und senkrecht zur Ebene.

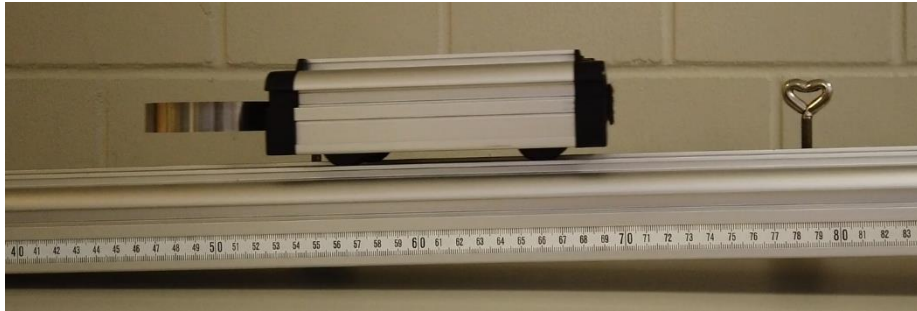


Abb.8 Experimentierwagen auf der geneigten Rollenfahrbahn.

III.3.6 Geben Sie die Abschnitte des Zeit-Weg-Diagramms an, wo die Einwirkung und die Momentangeschwindigkeit gleiche, bzw. entgegengesetzte Richtungen haben.

III.3.7 Geben Sie die Abschnitte des Zeit-Weg-Diagramms in der Abb.6 an, wo die Hangabtriebskraft eine regelmäßig beschleunigte, bzw. eine regelmäßig verzögerte Bewegung in diesem Experiment verursacht.

III.3.8 Leiten Sie den Weg numerisch im Tabellenkalkulationsblatt ab. Bestimmen Sie die Werte der Momentangeschwindigkeit wie in der Abb.8 gezeigt. Wählen Sie unterschiedliche Zeitintervalle  $\Delta t$  und die dazu gehörigen Werte der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$  in der Tabellenkalkulationsblatt. Welchen funktionalen Zusammenhang gibt es zwischen  $\Delta v$  und  $\Delta t$ ?

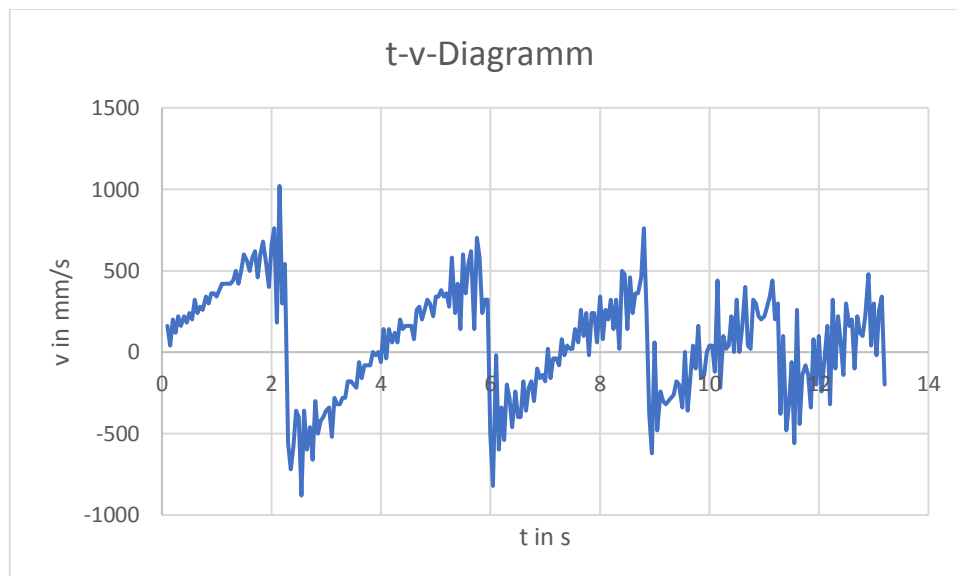


Abb.9 Die Momentangeschwindigkeit wird durch das numerische Ableiten im Tabellenkalkulationsblatt bestimmt.

III.3.9 Beschreiben das in der Abb.9 grafisch dargestellte Zeit-Geschwindigkeit-Diagramm im Zusammenhang mit der Bewegung des Fahrbahnwagen auf der geneigten Schiene. Legen Sie





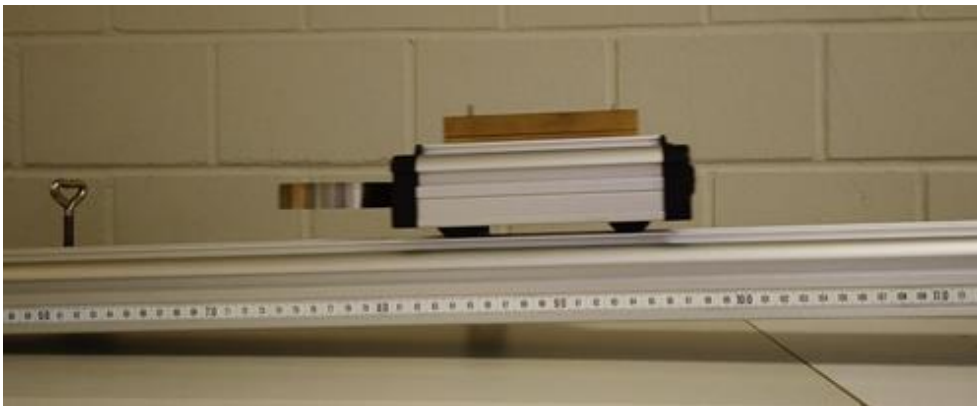
mit einem Lineal in den Punkten des t-v-Diagramms eine Ausgleichsgerade für jeden Abschnitt der Bewegung, die möglichst glatt zwischen den Punkten hindurchgeht und sich ihnen gleichzeitig möglichst gut annähert. Vergleichen Sie die entstandenen Ausgleichsgeraden miteinander.

III.3.10 Nun wird die Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$  bei unterschiedlichen Neigungswinkeln der Rollenfahrbahn untersucht. Man erarbeitet die in .csv-Format gespeicherten Messdaten des Wegs und der Zeit. In den Tabellenkalkulationsblättern für verschiedene Winkel werden die Werte der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$  beim gleichgroßen Zeitintervall  $\Delta t$  bestimmt. Welchen Zusammenhang gibt es zwischen  $\Delta v$  und Neigungswinkel?

III.3.11 Mit Hilfe der bekannten Masse des Experimentierwagens und des Neigungswinkels der Schiene kann man die Hangabtriebskraft berechnen. Wirkt diese Kraft auf den Körper für ein Zeitintervall  $\Delta t$ , so erhält der Körper einen Kraftstoß  $\vec{F} \cdot \Delta t$ . Der Bewegungszustand des Körpers ändert sich, und damit der Impuls  $\Delta \vec{p}$  des Körpers. Berechnen Sie die Impulsänderung des Objektes mit Hilfe der Geschwindigkeitsänderungswerte vom Tabellenkalkulationsblatt, und bestätigen Sie die dynamische Definition der Kraft.

III.3.12 Ausgehend von der dynamischen Definition der Kraft formulieren Sie die Newtonschen Gesetze der klassischen Mechanik.

III.3.13 Beschreiben Sie eine mögliche Änderung des Versuchs, wo die einwirkende Kraft nicht konstant bleibt. Wie würde sich die Geschwindigkeit des Körpers ändern? Überprüfen Sie Ihre Hypothese, indem Sie das Zeit-Weg-Diagramm in PhyPiDAQ-Fenster untersuchen.



*Abb.8 Experimentierwagen mit Zusatzmassen auf der geneigten Rollenfahrbahn.*

III.3.14 Nun wird der Einfluss der Masse des Experimentierwagens auf die Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$  des Objektes untersucht. Dazu werden Zusatzmassen auf dem Wagen aufgestellt. Untersuchen Sie das neue Zeit-Weg-Diagramm auf mögliche Änderungen.



### III.4 Fragen zum Thema Beschleunigung und Kräfte auf einen Körper auf der geneigten Fahrbahn

III.4.1 Manche der in der Abb.9 mithilfe eines Lineals gezogenen Ausgleichsgeraden, die möglichst glatt zwischen den Punkten hindurchgehen, verlaufen parallel zueinander. Erklären Sie diese Beobachtung. Bestimmen Sie zeichnerisch die Steigung dieser Geraden. Nach dem Stoß am unteren Hindernis der geneigten Bahn ändert sich der Verlauf der Momentangeschwindigkeit. Warum haben die Ausgleichsgeraden zweier benachbarten Abschnitte der Bewegung unterschiedliche Steigungen?

III.4.2 Aus den in .csv-Format gespeicherten Messdaten für einen größeren Neigungswinkel der Schiene kann man ein zweites t-v-Diagramm erstellen. Wie ändern sich die Steigungen der Ausgleichsgeraden?

III.4.3 Schreiben Sie die Definitionsformel der Beschleunigung auf, und erklären Sie den Zusammenhang zwischen den Beschleunigungswerten und den Steigungswerten der Ausgleichsgeraden im t-v-Diagramm. Auf welchen Abschnitten der Bewegung ist die Beschleunigung positiv, bzw. negativ?

III.4.4 Das in der Abb.6 gezeigte Zeit-Weg-Diagramm legt die Vermutung nahe, dass sich der Weg proportional zum Quadrat der Zeit auf jedem Abschnitt ändert. Ermitteln Sie den mathematischen Zusammenhang zwischen den beteiligten Größen in Form einer Funktion im Tabellenkalkulationsblatt.

III.4.5 In der folgenden Abbildung wird die Ausgleichskurven für den Abschnitt AB, bzw. BC des in der Abb.6 dargestellten Zeit-Wegs-Diagramms gezeigt. Erklären Sie die Bedeutung der Koeffizienten dieser Funktionen in Verbindung mit der Bewegung des Körpers, sowie mit dem Zeit-Geschwindigkeit-Diagramm.

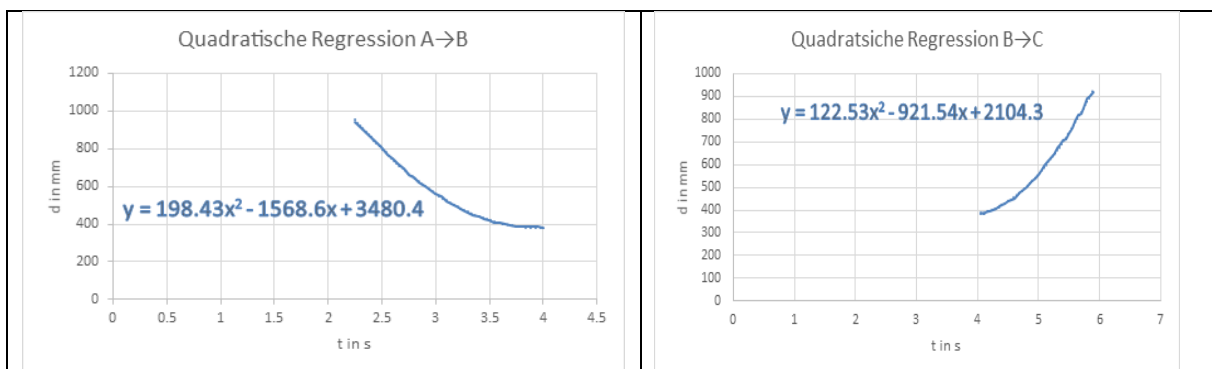


Abb.10 Quadratische Regressionen im Abschnitt AB, bzw. BC. Die Abhängigkeit des Wegs  $s$  von der Zeit  $t$  im Bereich der Messwerte wird gut beschrieben.

III.4.6 Bestimmen Sie die Koeffizienten der quadratischen Regressionen auf den Abschnitten CD und DE. Vergleichen Sie die Werte dieser Koeffizienten miteinander. Wiederholen Sie den Versuch, ohne Änderung des Neigungswinkels. Setzen Sie den Koeffizienten der  $t^2$  in Verbindung mit der Beschleunigung des Experimentierwagens.



III.4.7 Aus mehreren Messungen bestimmen Sie den Wert der Beschleunigung des Experimentierwagens für das Hinab-, bzw. für das Hinaufrollen des Experimentierwagens auf der Rollenfahrbahn. Warum sind die Werte der Beschleunigung unterschiedlich?

III.4.8 Die Vermutung, dass der Weg proportional zum Quadrat der Zeit wächst, wird durch Konstanz des Quotienten  $k = s/t^2$  für alle Datenpaare bestätigt. Dazu wird die Linearisierungsmethode angewendet, indem für alle  $n$  Wertepaare die Proportionalitätsfaktoren  $k = s/t^2$  in einem Tabellenkalkulationsblatt berechnet werden. Vergleichen Sie diese Werte miteinander sowie mit den  $t^2$ - Koeffizienten der quadratischen Regression.

III.4.9 Der Wert der Beschleunigung lässt sich über das Zeit-Weg-Gesetz  $S = \frac{a \cdot t^2}{2}$  bestimmen. Lesen Sie den Wert der zurückgelegten Strecke AB zwischen dem ersten Stoßpunkt A am unteren Endpuffer bis zur höchst erreichten Stelle B auf der Schiene, sowie des zugehörigen Zeitintervalls ab, und berechnen Sie daher die Beschleunigung für das Hinaufrollen. Wiederholen Sie das Verfahren für das Hinabrollen auf der Strecke BC, wobei C ist der zweite Stoßpunkt auf dem Endpuffer. Sind die Werte der Beschleunigung auf diesen zwei Strecken gleich?

III.4.10 Nun sucht man nach der Ursache der beschleunigten, bzw. der verzögerten Bewegung des Experimentierwagens. Auf welchen Teilstücken wirkt die Erde durch ihre Anziehung beschleunigend auf den Körper und auf welchen Teilstücken abbremsend?

III.4.11 Betrachten Sie alle auf den Fahrbahnwagen wirkenden Kräfte in der Abb. 8. Ergänzen Sie eine Kräftezerlegung parallel und senkrecht zur Ebene. Bestimmen Sie die Beschleunigung des Wagens aus der Kräfteaddition entlang der Bewegungsrichtung fürs Hinaufrollen und für Hinabrollen.

III.4.12 Beweisen Sie rechnerisch, dass die Werte der Beschleunigung unabhängig von der Masse des Experimentierwagens sind. Überprüfen Sie diese Aussage mit den aus den quadratischen Regressionen erworbenen Werten.

III.4.13 Begründen Sie die Tatsache, dass dieselbe Komponente der Schwerkraft eine beschleunigte und eine verzögerte Bewegung verursacht. Geben Sie die entsprechenden Abschnitte dieser Bewegungen in der Abb.6.

III.4.14 Die in diesem Material aufgezeichneten, visualisierten und gespeicherten Messwerte der Entfernung  $d$  des Experimentierwagens zum Sensor in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  entsprechen einem Neigungswinkel von  $1,8^\circ$ , wie in der Abb.11 gezeigt. Wie groß wäre die aus der Kräfteaddition ermittelte Beschleunigung, wenn die Reibung vernachlässigt wäre? Begründen Sie rechnerisch, dass die Beschleunigung beim Hinabrollen  $a_1$  mit Reibung kleiner als die Beschleunigung beim reibungslosen Fahren ist. Zeigen Sie rechnerisch, dass die Beschleunigung beim Hinaufrollen  $a_2$  größer als die beim Hinabrollen ist.

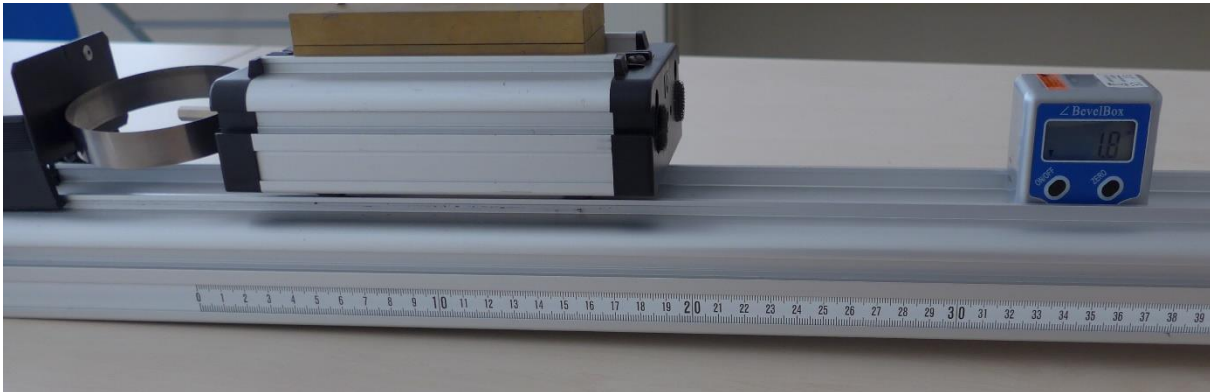


Abb.11 Neigungswinkel der Fahrbahn gemessen mit einem BevelBox-Winkelmesser.

III.4.15 Die aus der Kräfteaddition bestimmten Beschleunigungswerte für Hinabrollen  $a_1$  und für Hinaufrollen  $a_2$  sind vom Neigungswinkel  $\alpha$  der Rollenfahrbahn abhängig. Leiten Sie den Zusammenhang jedes Beschleunigungswertes vom Neigungswinkel her.

III.4.16 Überprüfen Sie den obigen Zusammenhang mit den aus den in .csv-Format abgeleiteten Messwerten der Beschleunigung  $a_1$  und  $a_2$  für unterschiedliche Neigungswinkel der Schiene. Die in diesem Material gespeicherten Messdaten entsprechen einem Winkel von  $1,8^\circ$ .

III.4.17 Bestimmen Sie die Beschleunigungswerte aus den Ausgleichskurven in der Abb.10 und setzen Sie diese in die folgende Formel ein. Vergleichen Sie den Wert des errechneten Neigungswinkels mit dem gemessenen Wert in der Abb.11.

$$\sin(\alpha) = \frac{a_1 + a_2}{2g}$$

III.4.18 Die aus der Kräfteaddition bestimmten Beschleunigungswerte für Hinabrollen  $a_1$  und für Hinaufrollen  $a_2$  ermöglichen die Bestimmung der Rollreibungszahl  $\mu_R$ , die wesentlich kleiner als die Gleitreibungszahl ist. Leiten Sie die Formel der Rollreibungszahl  $\mu_R$  abhängig von den Beschleunigungswerten  $a_1$  und  $a_2$ , sowie vom Neigungswinkel  $\alpha$  her.

III.4.19 Bestimmen Sie den Wert der sehr kleinen Rollreibungszahl  $\mu_R$  für den in der Abb.11 gemessenen Neigungswinkel  $\alpha = 1,8^\circ$  und für die zugehörigen Beschleunigungswerte  $a_1$  und  $a_2$ , die man aus den in der Abb.10 gezeigten Ausgleichskurven herausholen kann. Setzen Sie die Werte in die folgende Formel ein. Wie wurde diese Formel hergeleitet?

$$\mu_R = \frac{a_2 - a_1}{2g \cdot \cos(\alpha)}$$

III.4.20 Eine Möglichkeit zur Bestimmung der kleinen Rollreibungszahl  $\mu_R$  ist die direkte Messung der Fahrzeit im Abschnitt einer verzögerten gefolgt von einem der beschleunigten Bewegung. Dabei braucht man die Beschleunigungswerte  $a_1$  und  $a_2$  nicht mehr. Leiten Sie diese Formel für bekannten Neigungswinkel  $\alpha$  her.



III.4.21 Wählen Sie in der Abb.6 einen Abschnitt einer verzögerten gefolgt von einer beschleunigten Bewegung aus. Beispielweise lesen Sie  $t_{AB}$ , und  $t_{BC}$  in der .csv-Wertetabelle für dieselbe zurückgelegte Strecke ab. Vergleichen Sie die zwei Zeitwerte. Warum ist die Zeit  $t_{BC}$  der beschleunigten Bewegung länger als die Zeit  $t_{AB}$  der verzögerten Bewegung? Bestimmen Sie die Rollreibungszahl  $\mu_R$  mit Hilfe der folgenden Forme für den Neigungswinkel  $\alpha = 1,8^\circ$ . Vergleichen Sie den Wert mit der aus der Frage IV.4.19 berechneten Rollreibungszahl  $\mu_R$ .

$$\mu_R = \frac{(t_{BC}^2 - t_{AB}^2) \tan(\alpha)}{t_{BC}^2 + t_{AB}^2}$$

### III.5 Fragen zu mechanischen Energien und zur Energieumwandlung im Gravitationsfeld

Die Masse des Experimentierwagens mit Stoßfeder beträgt  $M = 0,5109$  Kg. Eine Zusatzmasse beträgt  $m = 0,500$  Kg

Der zugehörige Neigungswinkel zu dieser Messung beträgt  $\alpha = 1,8^\circ$ .

III.5.1 Eine ausführliche Untersuchung der Energieumwandlung im Gravitationsfeld kann man mit dem VL53L0X-Distanzmesssensor aufgenommenen Messwerte in diesem Versuch durchführen. Beschreiben Sie eine zeichnerische Methode mit der man die potenzielle und die kinetische Energie des Experimentierwagens an einem Punkt auf der Rollenfahrbahn ermitteln kann.

III.5.2 Ziehen Sie eine Parallele zur waagerechten Achse in der Abb.5 so, dass diese in mehreren Punkten das Zeit-Weg-Diagramm schneidet. Erklären Sie das mögliche Nutzen dieser Parallele zur Untersuchung der Energieumwandlung im Gravitationsfeld.

III.5.3 An den Schnittpunkten der oben eingeführten Parallele mit dem t-s-Diagramm in der Abb. 5 ziehen Sie Tangenten um die Momentangeschwindigkeit an diesen Stellen zu ermitteln. Welche Schlussfolgerungen kann man über die potenzielle, kinetische und gesamte Energie des Wagens ziehen?

III.5.4 Berechnen Sie die potenzielle, kinetische und die gesamte Energie des Experimentierwagens mit Hilfe der in .csv-Format gespeicherten Messdaten an einer Stelle auf der Fahrbahn. Wiederholen Sie die Rechnung für andere Neigungswinkel der Fahrbahn.

III.5.5 Beschreiben Sie die Energieumwandlung im System Erde-Körper für einen Abschnitt einer verzögerten gefolgt von einer beschleunigten Bewegung.

III.5.6 Die Gesamtenergie des Experimentierwagens bleibt während der Bewegung mit dem Richtungsumkehr auf der geneigten Schiene nicht konstant. Interpretieren Sie diese Beobachtung. Warum entstehen solche „Energieverluste“? Wo geht die Energie „verloren“?

III.5.7 Beschreiben Sie eine Methode zur rechnerischen Bestimmung der Energieverluste wegen der Rollreibung zwischen zwei nacheinander maximal erreichten Höhen auf der Fahrbahn.





III.5.8 Geben Sie zwei Formel zur Bestimmung der verrichteten Reibungsarbeit auf der zurückgelegten Strecke zwischen dem Stoßpunkt am unteren Endpuffer und dem maximal erreichten Punkt auf der Schiene. Berechnen und Vergleichen Sie die daraus erhaltenen Werte der Reibungsarbeit miteinander.

III.5.9 Leiten Sie eine Formel zur Bestimmung der Rollreibungszahl  $\mu_R$  ausgehend von den in .csv-Format gespeicherten Messwerten der maximal erreichten Höhen nach jeweiligem Stoß des Wagens her.

III.5.10 Zwei nacheinander maximal erreichten Stellen auf der Rollenfahrbahn können die Stelle B und C, wie in der Abb.6, sein. Zeigen Sie durch Rechnung, dass die Rollreibungszahl bei bekanntem Winkel  $\alpha$ , mit der folgenden Formel ermittelt werden kann:

$$\mu_R = \frac{(s_{BC} - s_{CD}) \tan(\alpha)}{s_{BC} + s_{CD}}$$

Unter welchen Voraussetzungen gilt diese Formel?

III.5.11 Berechnen Sie die Rollreibungszahl  $\mu_R$  mit Hilfe den in der .csv-Wertetabelle gespeicherten Werten der Entfernung d zum Sensor, gemäß Abb. 6. Vergleichen Sie den Wert mit Rollreibungszahl erhalten durch die anderen oben beschriebenen Methoden.

III.5.12 Warum sind die Energieverluste auf den verschiedenen zurückgelegten Strecken zwischen dem Stoß am unteren Hindernis und dem maximal erreichten Punkt nicht gleich?