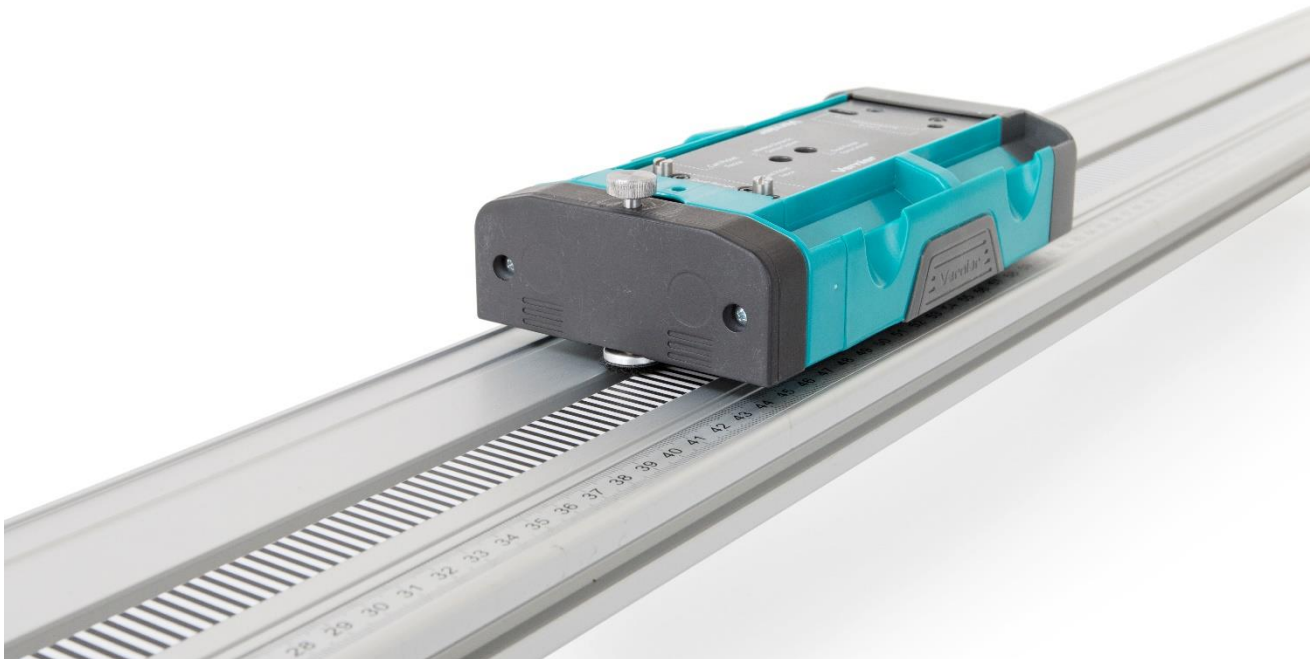


Inhaltsverzeichnis

Vernier Fahrbahn DTS-EC / DTS-EC-LONG mit Kodierstreifen zur berührungslosen Distanzmessung

1. Konzept und Einsatzmöglichkeiten	2
1.1 Beschreibung des Fahrbahnsystems	2
1.2 Einsatzbereiche	4
2. Komponenten des Vernier Fahrbahnsystems DTS-EC / DTS-EC-LONG	5
3. Zusätzliches Material (im Lieferumfang nicht enthalten)	10
3.1 Ergänzungs- und Erweiterungsmaterial	10
3.2 Ersatzteil-Kits	12
4. Einsatzbereiche	13
4.1 Kompatible Datenlogger für den Kodierempfänger MEC-BTD	13
4.2 Software: Logger Pro 3.11	14
5. Vorgehen zur Messwerterfassung mit der Vernier Fahrbahn DTS-EC / DTS-EC-LONG	14
6. Mechanische Experimente mit der Vernier Fahrbahn DTS-EC	15
6.1 Mechanische Basisexperimente	15
a) Geradlinig gleichförmige Bewegung (konstante Geschwindigkeit)	15
b) Geradlinig gleichmäßig beschleunigte Bewegung (konstante Beschleunigung)	15
c) Zweites Newton'sches Gesetz: Bewegungsgesetz	16
6.2 Stossexperimente: Impuls, Kraftstoss, Impulssatz	19
a) Vollkommen inelastischer Stoss	20
b) Vollkommen elastischer, zentraler Stoss	21
c) Stoss mit Gesamtimpuls null	24
6.3 Impuls, Kraftstoss, Drittes Newton'sches Gesetz, Potenzielle, kinetische und elastische Energie	25

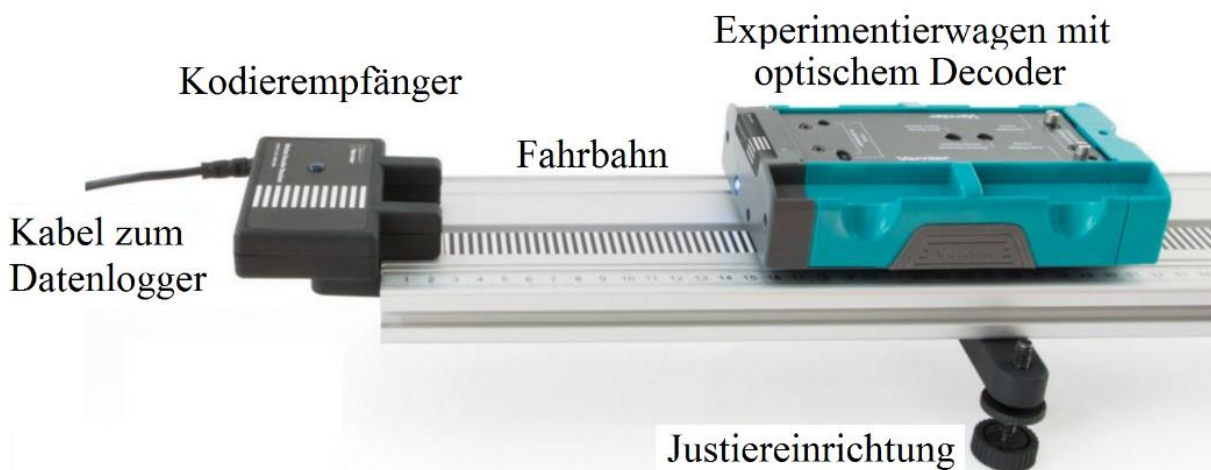


Vernier Fahrbahn DTS-EC / DTS-EC-LONG mit Kodierstreifen zur berührungslosen Distanzmessung

1. Konzept und Einsatzmöglichkeiten

1.1 Beschreibung des Fahrbahnsystems

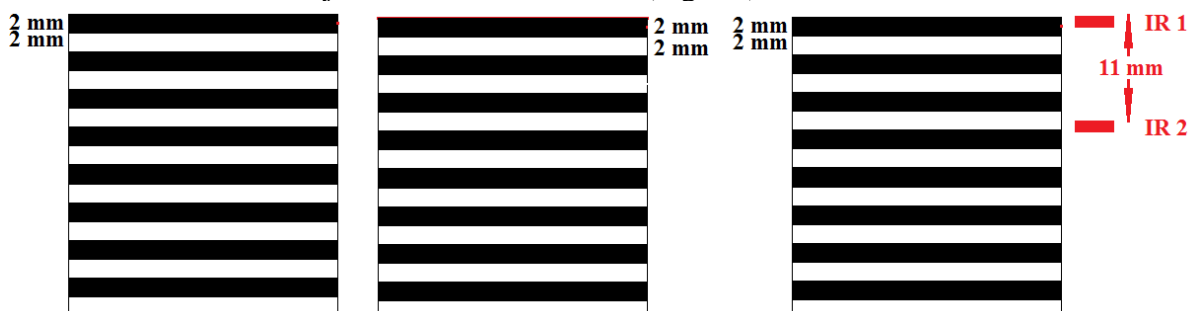
Die Fahrbahn (Dynamic Cart and Track System with Motion Encoder, DTS-EC und ETS-EC-LONG, Länge wahlweise 1.2 m oder 2.2 m) von Vernier ist mit einem neuartigen berührungslosen Distanz-mess-System ausgestattet, das es erlaubt, exakte kinematische und dynamische oder Stoss-Messungen mit einem oder zwei Experimentierwagen *ohne* den heute übliche Ultraschall-Distanzsensoren durchzuführen. Das System benutzt ein Längen-Kodier-System, das ähnlich funktioniert, wie ein traditioneller Winkelcodierer (shaft encoder).



Figur 1: Vernier Fahrbahn DTS-EC / DTS-EC-LONG mit Experimentierwagen DTS-CART-MEC und Kodierempfänger MEC-BTD

Das Fahrbahn-System DTS-EC / DTS-EC-LONG enthält drei Hauptbestandteile, eine **Fahrbahn**, einen oder zwei **Experimentierwagen** mit optischem Decoder sowie einen oder zwei **Kodier-Empfänger**.

- a) Die **Fahrbahn** (Track, wahlweise 1.2 m oder 2.2 m lang) mit zwei parallel angeordneten Kodier-Streifen (Motion Encoder Long Track Strip, METS-LONG) aus abwechslungsweise weissen und schwarzen, je 2 mm breiten Streifen (Figur 2).



Figur 2: Zwei Kodierstreifen auf der Fahrbahn (links), Messprinzip (rechts)

Diese beiden Kodier-Streifen dienen zwei unabhängigen Wegmessungen. Seitlich versetzt sind an der Unterseite der Experimentierwagen DTS-CART-MEC in einem Abstand von 11 mm zwei IR-Reflexkoppler IR 1 und IR 2 (Figur 2, rechts) angebracht. Diese beiden Reflexkoppler registrieren das schwarz-weiss-Muster des Kodier-Streifens. Die um 11 mm versetzte Anordnung erlaubt es, den vom Experimentierwagen zurückgelegten Weg mit einer Genauigkeit von 1 mm zu messen und zudem die Fahrtrichtung des Wagens (links/rechts) zu bestimmen. Die Daten werden auf einem schmalen modulierten (unsichtbaren) Lichtstrahl eines IR-Fototransistors zum Dekodier-Empfänger übertragen. Der Fototransistor befindet sich neben dem blauen LED-Schalter an einer der beiden Wagenfronten. Der IR-Lichtstrahl zum Dekodier-Empfänger darf nicht abgedeckt werden. Die Datenübertragungsrate beträgt maximal 30 Hz. Höhere Übertragungsraten führen zu Fehlern. Im Gegensatz zur Ultraschall-Distanzmessung ist die hier angewandte Streifenzählmethode eine relative Längenmessmethode ohne absoluten Bezugspunkt. Die Einstellung auf die gewünschte Länge «null» erfolgt über die Software, bei Logger Pro z.B. über *Versuch => Auf Null stellen...*. Das Richtungsvorzeichen (plus nach rechts, minus nach links oder umgekehrt) kann in der Messsoftware gewählt werden, bei Logger Pro 3.11 mit *Versuch => Sensoren konfigurieren => Alle Schnittstellen anzeigen => Dig/Sonic1, Decoderwagen*. Die Zahl der Messpunkte für die Berechnung der ersten und zweiten zeitlichen Ableitung zur Ermittlung von Geschwindigkeit und Beschleunigung kann in Logger Pro 3.11 unter *Datei => Einstellungen für Unbenannt* gewählt werden. Eine grössere Anzahl Messpunkte ergibt «ruhigere» Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Graphen, eine kleinere Zahl dagegen mehr Detailinformationen.

- b) Die **Experimentierwagen** (dynamic carts) DTS-CART-MEC sind mit 4 reibungsarmen Rädern und einer ausbaubaren optoelektronischen Schaltung ausgestattet: Eingebaut sind ein blauer LED-Schalter, zwei IR-Reflexkoppler auf der Unterseite, welche das Kodierstreifenmuster berührungsfrei ablesen (siehe oben), ein IR-Fototransistor zur Datenübertragung neben dem LED-Schalter sowie vier AAA-Batterien.
- c) Der **Kodierempfänger** (Motion Encoder Receiver MEC-BTD) gibt die Positions- und Zeitdaten des Experimentierwagens über ein Kabel an einen Datenlogger, z.B. LabQuest, LabQuest 2, LabQuest mini, LabQuestStream oder LabPro, weiter. Der Datenlogger stellt die Weg-Zeit-Daten wahlweise auf dem eingebauten Bildschirm dar (LabQuest, LabQuest 2) oder überträgt diese via USB-Kabel an einen Computer (PC/Mac), wo sie mithilfe der Software «Logger Pro 3.11» aufgezeichnet und weiterverarbeitet werden können (Weg-Zeit-, Geschwindigkeit-Zeit- und Beschleunigung-Zeit-Diagramm).

Achtung: Der Kodierempfänger MEC-BTD funktioniert **nicht** mit dem TI LabCRADLE. Verbindet man den Empfänger MEC-BTD mit dem LabCRADLE, wird im Labcradle sämtlicher Code gelöscht! Das Gerät wird unbrauchbar und muss eingeschickt werden. Die Daten können aber mit einem Datenlogger gemessen und anschliessend zur Auswertung auf TI-nspireCAS übertragen und dann weiterverarbeitet werden.

Das neuartige Längenmesssystem der Vernier Fahrbahn DTS-EC hat grosse Vorteile: Die Messung funktioniert sofort, es gibt keine frustrierenden Probleme mit Streusignalen und Seitenkeulen mehr, wie sie bei Ultraschall-Distanzmessungen häufig auftraten. Weil die Distanzdaten auf einem schmalen IR-Strahl zum Kodier-Empfänger übertragen werden, können die Positionen von **zwei** Experimentierwagen auf derselben Fahrbahn zugleich ermittelt werden (für Stoss-Experimente).

Das System erfordert keinerlei Abgleich oder Justierung. Sobald der Kodier-Empfänger MEC-BTD auf eines der beiden Bahnenden gesteckt worden ist und der Experimentierwagen in den vorgesehenen Nuten rollt, funktioniert die Längen- und Zeitmessung sofort.

1.2 Einsatzbereiche

Das System ist für den Physikunterricht auf Mittel- und Hochschulstufe zur Bewegungsanalyse, für Stoss- und mechanische Energieexperimente konzipiert. Ein Erweiterungs-Kit (OEK) verwandelt diese Fahrbahn in eine optische Bank, welche Experimente zur Geometrischen Optik ermöglicht (Linsen, Fernrohr, Farbmischung, $1/r^2$ – Abhängigkeit der Lichtintensität).

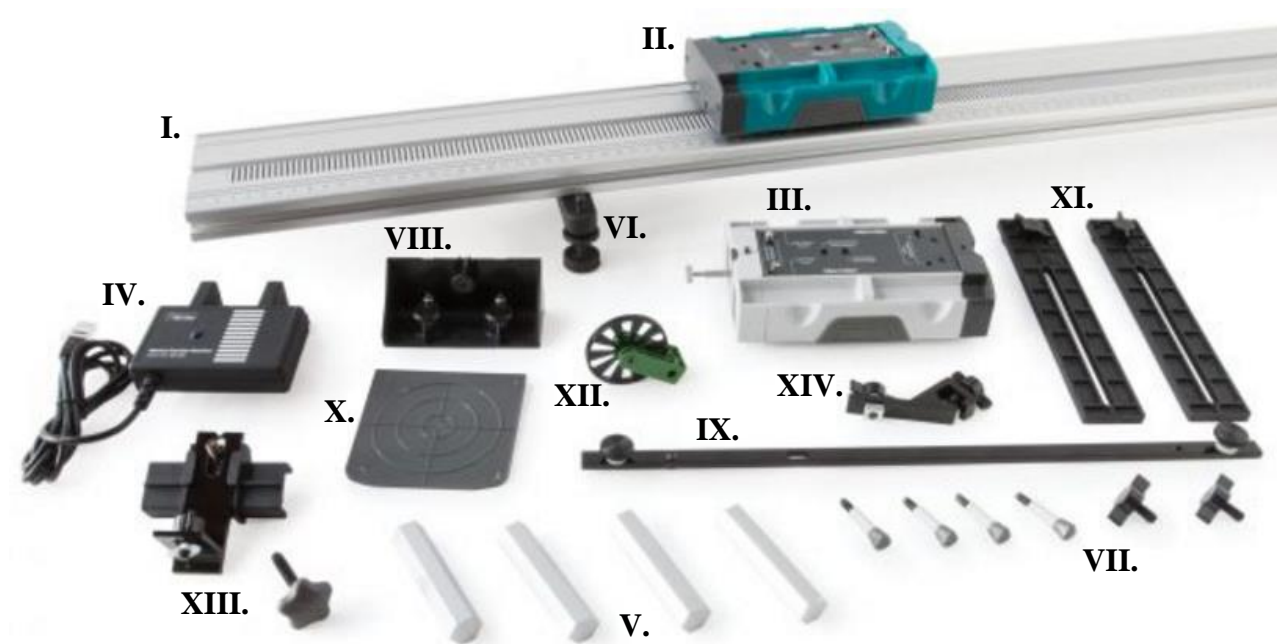
Typische Experimente mit dem Vernier Fahrbahnsystem DTS-EC / DTS-EC-LONG sind:

- Experimente zur gleichförmigen Bewegung
- Experimente zur gleichmässig beschleunigten Bewegung (auf der schiefen Ebene oder mit einem Beschleunigungsgewicht, 2. Newton'sches Gesetz)
- Vollständig in-elastischer Stoss mithilfe von mitgelieferten Klettverschlussklebern (hook-and-pile tabs) auf den Stossstellen der Experimentierwagen (hook-pad des Klettverschlusses auf der linken, pile-pad auf der rechten Seite eines Experimentierwagens).
- Vollständig elastischer Stoss mithilfe eingebauter abstossender Supermagnete (Neodym) an den Stossstellen der Experimentierwagen.
- Vollständig elastische Stösse des Plunger Carts DTS-Cart-P mit eingebautem Feder-Stosskolben. Dieser kann von einem zweiten Experimentierwagen ausgelöst werden kann («superelastic collisions» mit Gesamtimpuls null).

Das vergleichsweise preisgünstige Fahrbahnsystem DTS-EC eignet sich neben dem Einsatz im Physikunterricht besonders auch im **Physikpraktikum**.

Es erlaubt Schülerinnen und Schülern sowohl einen spielerisch-qualitativen als auch exakt-quantitativen Zugang zu den für sie zu Beginn des Physikunterrichts schwierigen Grössen Weg, Zeit, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Der experimentelle Zugang nimmt dem für viele unbeliebten Kapitel «Kinematik» einen Teil seines Schreckens.

2. Komponenten des Vernier Fahrbahnsystems DTS-EC / DTS-EC-LONG



Figur 3: Vernier Fahrbahnsystems DTS-EC / DTS-EC-LONG. Hauptkomponenten und Hilfsmaterial (Lieferumfang)

a) Hauptkomponenten

Das Fahrbahnsystem umfasst vier Hauptteile, die Fahrbahn (**I**), zwei Experimentierwagen (**II**, **III**), einer mit und einer ohne Distanzmesselektronik sowie einen Kodier-Empfänger (**IV**):

- I. 1.2 m / 2.2 m Fahrbahn** / optische Bank mit zwei aufgeklebten Kodierstreifen zur berührungsfreien Distanzmessung (Dynamic Track / Optic Bench with encoder strip, Figur 1).
- II. Kunststoffexperimentierwagen DTS-CART-MEC** mit reibungsarmen Rädern, einem optischen Dekoder zur direkten Distanzmessung und einem IR-Sender zur Übertragung der Daten zum Kodier-Empfänger (Figur 4). Wird eine 2.2 m-Bahn benutzt, muss der IR-Sender auf eine höhere Leistung umgestellt werden (Schalter im Batteriefach). Der Wagen hat auf einer Seite zwei Stossstellen, die für Stossversuche wahlweise mit magnetischen Stossdämpfern oder Klettverschluss-Kupplungen (hook-and-pile tabs) bestückt werden können. Zum Betrieb des Decoders sind zwei AAA 1.5 Volt-Batterien (oder Akkus) erforderlich (im Lieferumfang nicht enthalten).



*Figur 4: Experimentierwagen mit Decoder
DTS-CART-MEC*



*Figur 5: Experimentierwagen DTS-Cart-P mit
Feder-Stosskolben*

Ein Anti-Roll-Nocken an der Wagenunterseite sorgt dafür, dass der Wagen auf der Schiene frei rollen kann, aber nicht vom Tisch fällt.

- III. Reibungsarmer Experimentierwagen** ohne optischen Decoder zur direkten Distanzmessung (Figur 5, Plunger Cart, DTS-CART-P). Mit vier Stossstellen, zwei vorne, zwei hinten, die wahlweise mit magnetischen Stossdämpfern oder Klettverschluss-Kupplungen (hook-and-pile tabs) bestückt werden können sowie einem Anti-Roll-Nocken auf der Unterseite.

Dieser Wagen enthält einen von oben oder von vorne mechanisch auslösbaren Feder-Stosskolben für Stossexperimente. Die Stosskraft des Stosskolbens kann durch Drehen des Kolbens eingestellt werden und wird an einer nicht kalibrierten Skala auf der Unterseite angezeigt. Dreht man mit einem kleinen Schraubenzieher an einer kleinen dunkelgrauen Kunststoffschraube direkt unterhalb des Stosskolbens, so bewegt sich diese nach vorn und wird zum frontseitigen Auslöser des Feder-Stosskolbens. So können «super-elastische» Stösse zwischen **zwei** Experimentierwagen auf der Fahrbahn durchgeführt werden

Auf der Oberseite beider Experimentierwagen können Kraft und Beschleunigungssensoren sowie Zusatzgewichte (max. 4 Stück à 125 g) befestigt werden. Der «Dual-Range-Force-Sensor (DFS-BTA)» und das «Low-g-Accelerometer (LGA-BTA)», sind kabelgebundene Sensoren, das «Wireless Dynamic Sensor System (WDSS)» ist drahtlos. Der Plunger Cart DTS-CART-P kann mithilfe eines Motion Encoder Cart Upgrade Kit MECT (Figur 26) zu einem Motion Encoder Cart mit optischen Decoder zur direkten Distanzmessung umgerüstet werden.

- IV. Kodierempfänger MEC-BTD** (Figur 1) zur Übertragung des Distanzsignals auf einen Datenlogger (z.B. LabQuest 2) mit Direktanzeige oder Übertragung auf einen Computer (PC/Mac) mit Messwerterfassungssoftware (aktuell Logger Pro 3.11)

b) Hilfsmaterial

- V. Vier Massenstücke** (Sechskant-Profil, 125 g) zur Belastung der Experimentierwagen (nur für Kunststoff-Experimentierwagen, Figur 6). Die Massenstücke müssen in den Massefächern des Experimentierwagens so angeordnet werden, dass dieser ausbalanciert ist (gleiche Masse auf beiden Seiten des Wagens). Die nominelle Masse des Experimentierwagens beträgt 340 g (ohne Stossmagnete, Klett-Kupplungen, Sensoren). Für massekritische Experimente sollte der Wagen gewogen werden.



Figur 6: Massenstücke (125 g)



Figur 7: Nivellierfuss

- VI. Justiereinrichtung** zur Einstellung der exakt horizontalen Lage der Fahrbahn (2 Stück) mit vier Nivellierschrauben (Figur 7).
- VII. Befestigungsmaterial** für den «Dual-Range-Force-Sensor» und das «Low-g-Accelerometer» (2 grosse und 4 kleine Schraubstifte, Figur 8, 10 und 11).



Figur 8: Schraubstifte für die Montage des «Dual-Range Force Sensors» bzw. des «low-g Accelerometers»



Figur 9: Experimentierwagen mit Stos-Einschüben, links: montiert, rechts: entfernt

Die Vernier-Experimentierwagen werden mit magnetischen Stossdämpfern und Klettverschluss-Kupplungen (hook-and-pile tabs). Diese können wahlweise in zwei, bzw. vier demontierbare Stosseinschübe (Collision Tabs, Figur 9) eingebaut werden. Diese Stosseinschübe haben zwei Seiten, eine mit N markierte für Magnetmontage, bzw. eine glatte, auf welche die Klettverschlusskupplungen aufgeklebt werden können. Montage mit 3/32''-Inbusschlüssel (Figur 18). Die Magnete können für berührungsfreie, nahezu elastische Stöße zwischen zwei Experimentierwagen verwendet werden. Die Magnete werden dabei so montiert, dass sie sich gegenseitig abstossen (Nord gegen Nord). Da Magnetfelder Messungen stören können, sollten die Magnete nur dann in die Wagen eingebaut werden, wenn sie fürs Experiment erforderlich sind; sonst sind sie auszubauen.



Figur 10: Experimentierwagen mit zwei Massentücken und «Dual-Range-Force-Sensor»



Figur 11: Experimentierwagen «Dual-Range-Force-Sensor und low-g-Accelerometer»

VIII. Der Endanschlag (Adjustable End Stop AS-VDS) wird am Ende der Fahrbahn montiert (Figuren 12 und 13). Er verhindert, dass der Experimentierwagen die Fahrbahn verlässt. Bei Bedarf können wie an Experimentierwagen magnetische Stossdämpfer oder Klettverschluss-Kupplungen (hook-and-pile tabs / magnetic inserts / end caps) montiert werden. **Nur** für langsame Stöße, sonst entgleisen die Wagen!



Figur 12: Endanschlag (rechts) mit Kupplungs- bzw. Stossdämpfermaterial (Magnete)



Figur 13: Endanschlag auf der Fahrbahn montiert

- IX.** Halterung (DTS-MDB) für einen Ultraschall-Distanz-Detektor (Motion Detector MD-BTD), falls ein solcher zusätzlich verwendet werden sollte. Messdistanz bis 6 m, Minimaldistanz 15 cm für neuere Detektoren mit Bereichsschalter, 45 cm für ältere Sensoren ohne Bereichsschalter.



Figur 14: Halterung für einen Ultraschall-Distanzsensor

- X.** Ultraschall-Reflektorscheibe (Motion Detector Reflector Flag, DTS-FLAG, Figuren 15 und 16) mit 2 Magneten für die Befestigung an den Magnet-Stosstellen des Experimentierwagens.



Figur 15: Ultraschall-Distanzsensor auf Halterung montiert (links). Experimentierwagen mit Reflektorscheibe (rechts)



Figur 16: Ultraschall-Reflektorscheibe

- XI.** 2 Klammern (Photogate Brackets PGB VDS) zur kopf- oder stirnseitige Befestigung einer Lichtschranke (Photogate VPG BTD) an der Fahrbahn (Figuren 17, 19 und 20).



Figur 17: Photogate Bracket PGB VDS



Figur 18: Inbus-Schlüssel 3/32 Zoll (Allen wrench 3/32 inch)



Figur 19: stirnseitige Befestigung einer Lichtschranke mit Speichenrad (Ultra Pulley)



Figur 20: kopfseitige Befestigung einer Lichtschranke (Wagen mit Streifenmuster, Cart Picket Fence PF-CART)

XII. Speichenrad (Ultra Pulley Attachment SPA, Figur 21)

XIII. Befestigungsklammer (Pulley Bracket B-SPA, Figuren 19 und 22) für das Speichenrad (Ultra Pulley)



Figur 21: Speichenrad



Figur 22: Befestigungsklammer für das Speichenrad

XIV. Stangen-Muffe (Rod Clamp RC-VDS, Figur 23 und 24). Zur Befestigung einer Stativstange (max. 12 mm Durchmesser) mit Fuss auf einer Seite der Fahrbahn. So wird die Fahrbahn zur schiefen Ebene



Figur 23: Stangen-Muffe



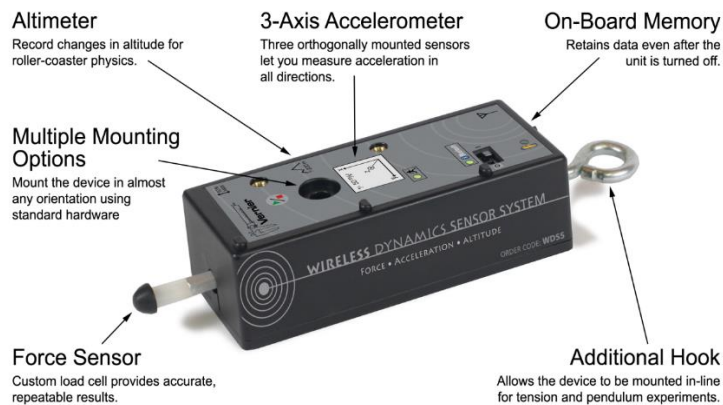
Figur 24: Fahrbahn als schiefe Ebene mit Stangen-Muffe Stativstange und Stativfuss

Ebenfalls enthalten: Inbus-Schlüssel 5/32 Zoll (Allen wrench 5/32 inch, Figur 18) zur Montage von magnetischen Stossdämpfern bzw. der Klettverschluss-Kupplungen (hook-and-pile tabs).

3. Zusätzliches Material (im Lieferumfang nicht enthalten)

3.1 Ergänzungs- und Erweiterungsmaterial, Details siehe www.vernier.com

- I. Dual-Range Force Sensor DFS (Figuren 10 und 11). Wird häufig verwendet!
- II. Low-g Accelerometer LGA (Figur 11)
- III. Wireless Dynamic Sensor WDSS (Figur 25). Alternative zum « Dual-Range Force Sensor DFS »



Figur 25: Wireless Dynamic Sensor WDSS

- IV. Motion Encoder Cart Upgrade Kit MECT (Figur 26)



Figur 26: Motion Encoder Cart Upgrade Kit MECT



Figur 27: Cart Friction Pad DTS PAD

- V. Friction Pad DTS-PAD für Versuche mit Reibung (Figur 27)
- VI. Photo Gate VPG-BTD (Figuren 28, 19 und 20)

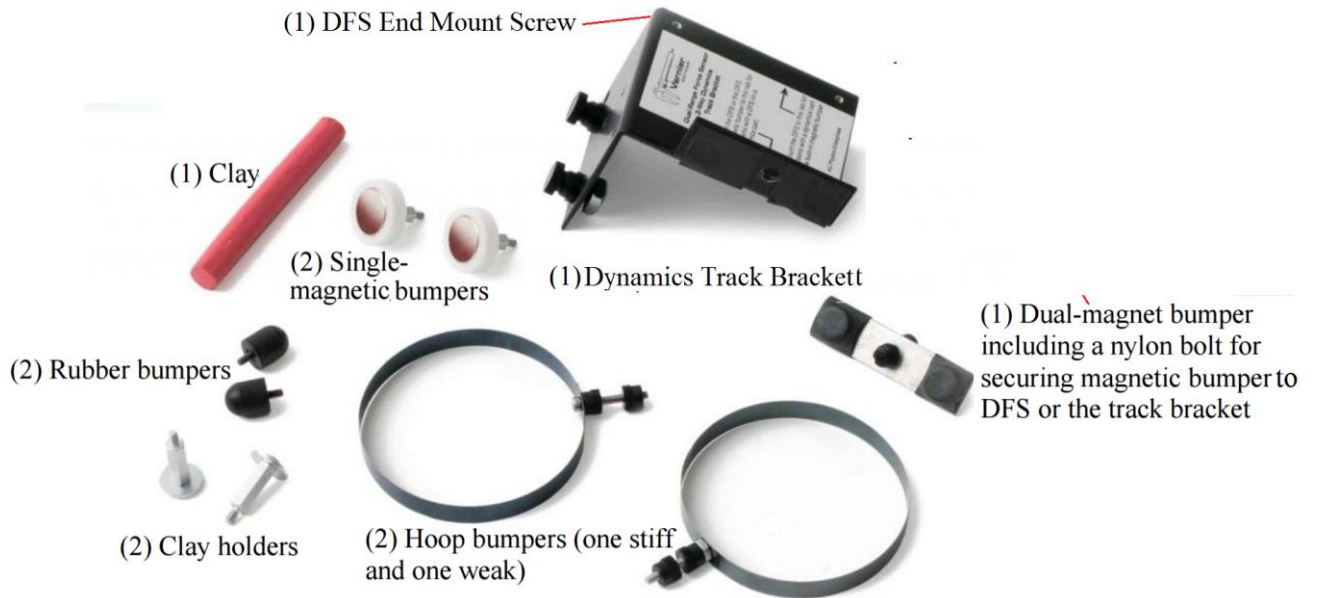


Figur 28: Photo Gate VPG-BTD



Figur 29: Cart Picket Fence PF-CART

- VII. Cart Picket Fence PF-CART (Figur 29) zur Positions, Geschwindigkeits und Beschleunigungsmessung mit Lichtschranken (Photo Gate VPG-BTD). Für ältere Fahrbahnen ohne berührungslose Distanzmessung.
- VIII. Bumper and Launcher Kit BLK für Energie- und Stossversuche mit einem Dual Range Force Sensor DFS-BTA



Figur 30: Bumper and Launcher Kit BLK

- IX. Encoder Fan Cart CART-FEC (Figur 31)
- X. Optics Expansion Kit OEK (Figur 32)



Figur 31: Encoder Fan Cart CART-FEC



Figur 32: Optics Expansion Kit OEK

- XI. Color Mixer CM-OEK (Figur 33)
- XII. Diffraction Apparatus DAK



Figur 33: Color Mixer CM-OEK



Figur 34: Diffraction Apparatus DAK

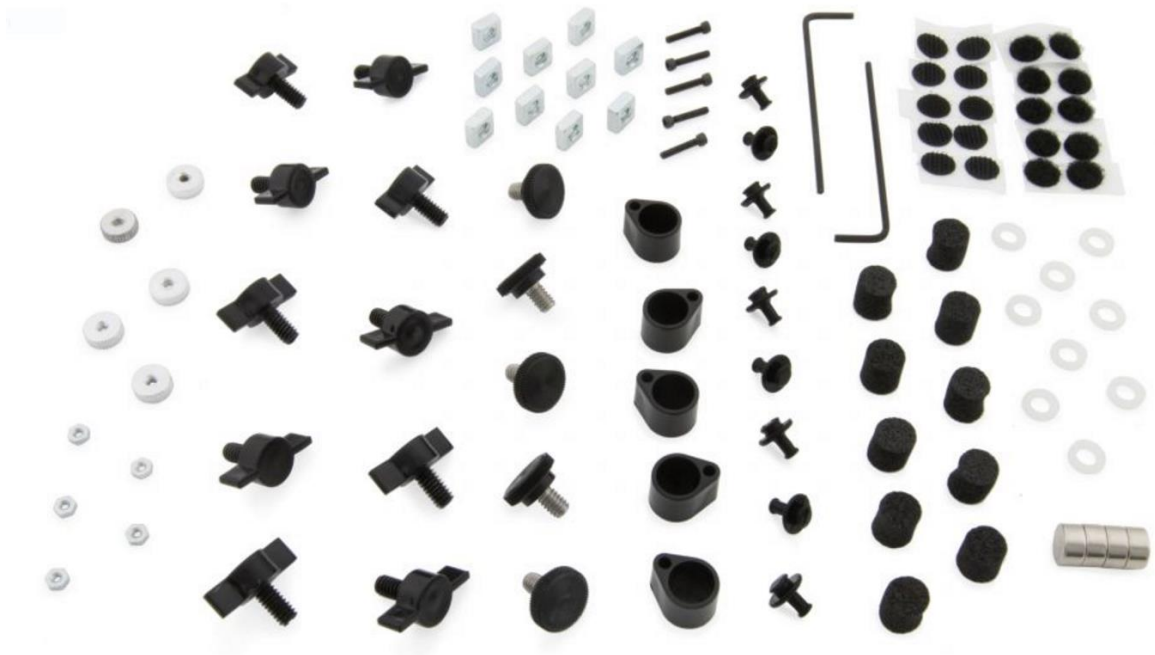
3.2 Ersatzteil-Kits

- 1. Hook and Pile / magnetic end caps VMC-VDS



Figur 35: Hook and Pile /magnetic end caps-Kit

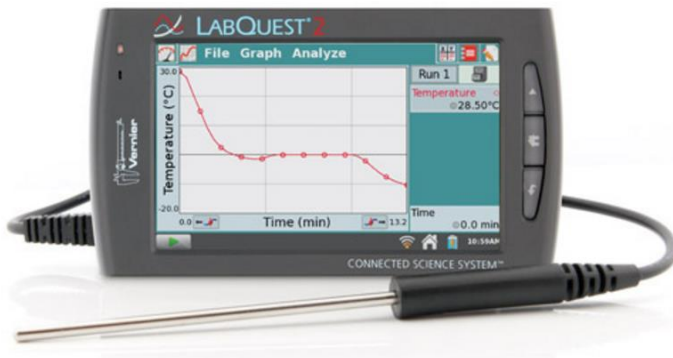
2. VDS-RPK Vernier Dynamics System Replacement Parts Kit



Figur 36: VDS-RPK Vernier Dynamics System Replacement Parts Kit

4. Software und Interfaces (im Lieferumfang nicht enthalten)

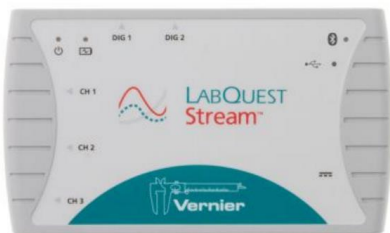
4.1 Kompatible Datenlogger für den Kodierempfänger MEC-BTD (www.vernier.com/dts-ec)



LabQuest 2 (autonom, mit Bildschirm)



LabQuest Mini (ohne Bildschirm, preisgünstig)



LabQuest Stream



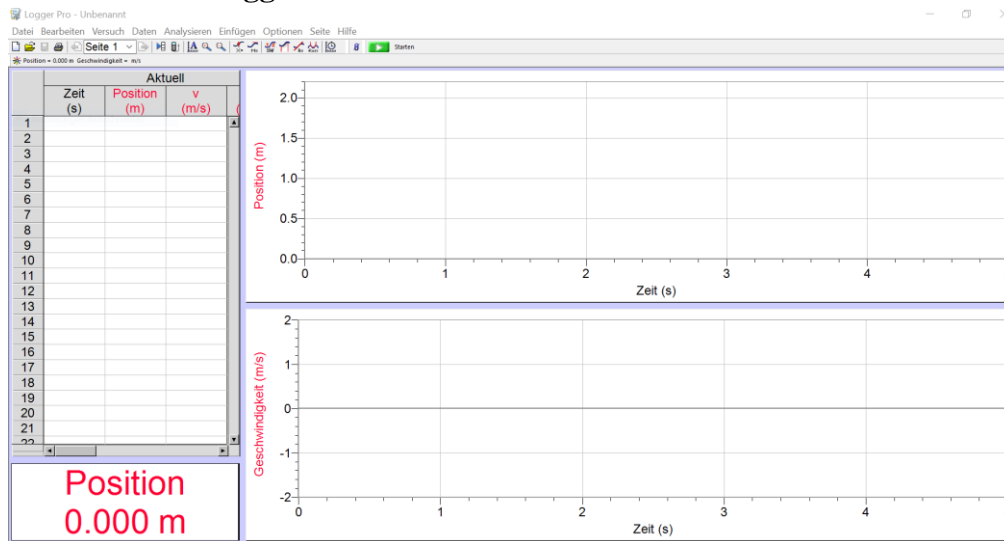
Labquest (veraltet)



LabPro (veraltet)

Figur 37: kompatible Datenlogger

4.2 Software : Logger Pro 3.11



Figur 38: Logger Pro 3.11 Hauptbildschirm

5. Vorgehen zur Messwerterfassung mit der Vernier Fahrbahn DTS-EC / DTS-EC-LONG

- Befestigen Sie den Kodierempfänger MEC-BTD an der Fahrbahn (Figur 1). Die Kodierstreifen auf der Fahrbahn und die Markierungen an den Empfänger müssen übereinstimmen.
- Stellen Sie die Fahrbahn auf eine horizontale Fläche (Tisch). Justieren Sie die horizontale Lage der Bahn mit den beiden Nivellierfüßen.
- Legen Sie zwei AAA-Batterien in den Experimentierwagen.
- Verbinden Sie das Kabel des Kodierempfängers mit einem der beiden Digitaleingänge (Dig1 oder Dig 2) eines Datenloggers (Figur 37). Wenn Sie mit einem Computer arbeiten, verbinden Sie diesen über ein USB-Kabel (mini-USB - USB A) mit dem Datenlogger.
- Schalten Sie die Elektronik des Experimentierwagens mit dem eingebauten Druckschalter ein. Dieser leuchtet dann blau auf.
- Stellen Sie den Experimentierwagen auf die Fahrbahn und achten Sie darauf, dass sich die vier Räder in den vorgesehenen Nuten bewegen. Die blaue LED muss gegen den Kodierempfänger gerichtet sein.
- Starten Sie die Messwerterfassung und bewegen Sie den Wagen: Die Daten werden vollautomatisch erfasst und im grafisch dargestellt (Logger Pro 3.11).

Spezifikationen

Messbereich: 1 m bzw. 2m

Genauigkeit / Längenauflösung 1 mm


Optimale Messwerterfassungsrate: 15 – 30 Hz (Übertragungsfehler für Raten > 30 Hz)

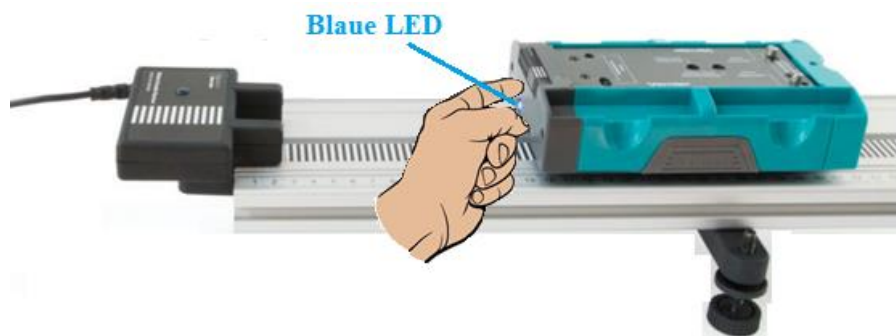
Literatur: Larry Duckerich [LD], Advanced Physics with Vernier – Mechanics, 2011, ISBN 978-1-929075-64-5

6. Mechanische Experimente mit der Vernier Fahrbahn DTS-EC

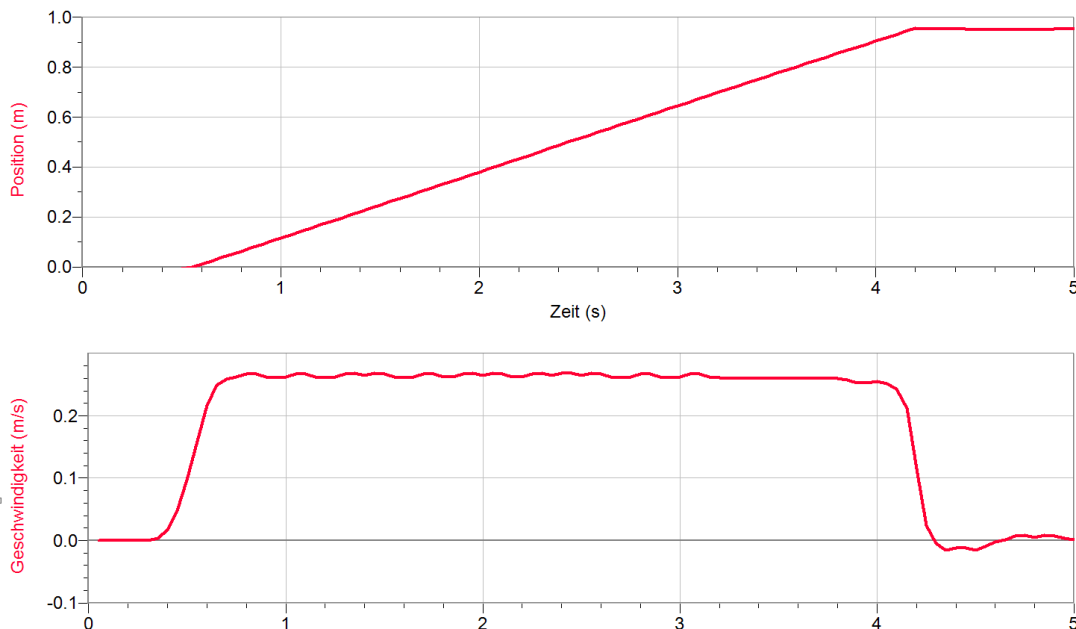
6.1 Mechanische Basisexperimente

a) Geradlinig gleichförmige Bewegung (konstante Geschwindigkeit)

Der Kodierempfänger wird z.B. links an der Fahrbahn angebracht (Figur 39) und mit dem Datenlogger (LabPro, LabQuest) verbunden. Der Datenlogger wird mit einem USB- (mini/A) Kabel an einen Computer angeschlossen und das Messwerterfassungsprogramm (Logger Pro 3.11) gestartet. Der Kodierwagen wird zum Kodierempfänger bewegt; dann wird die Längenmessung auf null eingestellt (Logger Pro: *Versuch => Auf null stellen => Encoderwagen*). Bei horizontaler Fahrbahn wird der Experimentierwagen mit Decoder jetzt kurz angestoßen (Figur 39) und die Messung gestartet (Logger Pro:  Starten).



Figur 39: Kodierempfänger, Coderwagen: Blaue LED zum Empfänger gerichtet

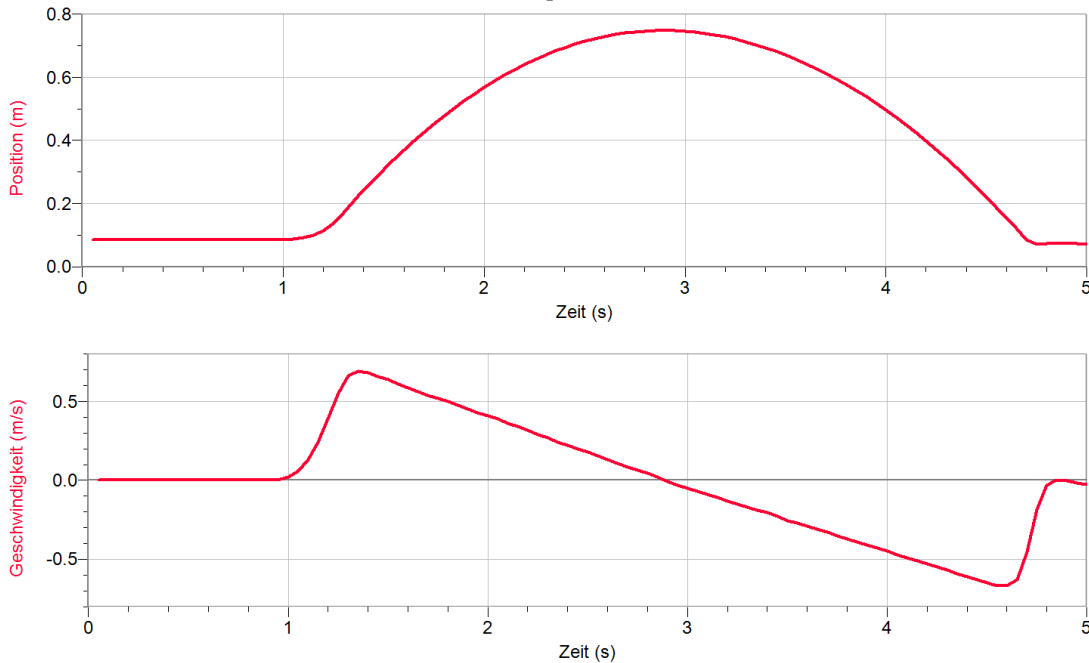


Figur 40: Gleichförmige Bewegung: Weg-Zeit und Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme

b) Geradlinig gleichmäßig beschleunigte Bewegung (konstante Beschleunigung)

Dieses Experiment wird analog zu Experiment a) aber mit leicht geneigter Fahrbahn (d.h. auf einer schiefen Ebene durchgeführt (Bahn gegenüber dem Kodierempfänger um ca. 10 cm

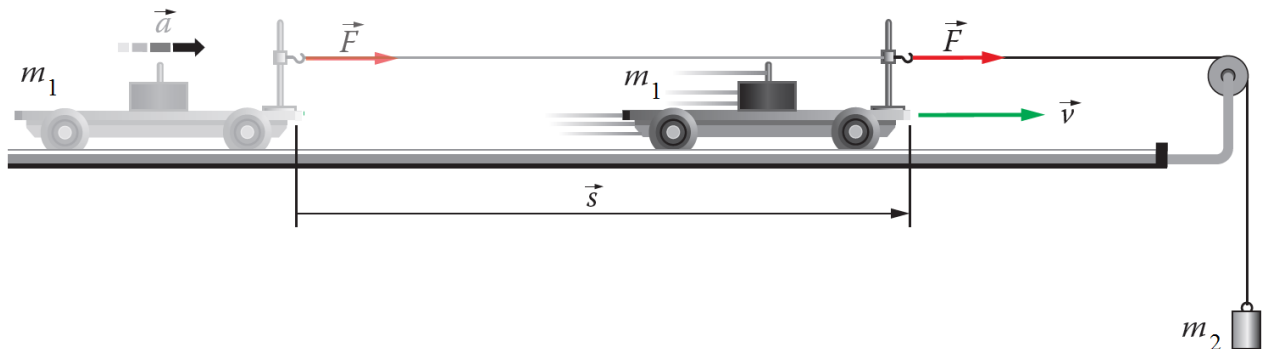
anheben). Der Coderwagen wird zum Kodierempfänger geschoben und die Längenmessung auf null gestellt. Dann wird der Wagen nach oben gestossen und die Messung gestartet: (Logger Pro:).



Figur 41: Gleichförmig beschleunigte Bewegung auf der schiefen Ebene:
Weg-Zeit und Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme

c) Zweites Newton'sches Gesetz: Bewegungsgesetz

Beim klassischen Experiment wird ein Experimentierwagen der Masse m_1 auf einer horizontalen Fahrbahn von einem kleinen Hakengewicht der Masse m_2 beschleunigt bewegt. Das Hakengewicht ist über einen dünnen Faden und ein sehr leichtes reibungsarmes Umlenkrad (Speichenrad, Ultra Pulley) mit dem Experimentierwagen verbunden (Figur 42).



Figur 42: klassisches Experiment zum zweiten Newton'schen Gesetz

Die beschleunigende Kraft ist $m_2 \cdot g$, die gesamte beschleunigt bewegte Masse ($m_1 + m_2$), also gilt gemäss zweitem Newton'schem Gesetz

$$(m_1 + m_2) \cdot a = m_2 \cdot g$$

Damit erhalten wir für die Beschleunigung a und die Kraft F , welche den Wagen beschleunigt

$$a = \frac{m_2 \cdot g}{m_1 + m_2} \quad \text{und} \quad F = m_1 \cdot a = m_1 \cdot \frac{m_2 \cdot g}{m_1 + m_2} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot m_2 \cdot g < m_2 \cdot g \quad (!)$$

Startet der Wagen aus der Ruhe, so gilt für den zurückgelegten Weg

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_2 \cdot g}{m_1 + m_2} \cdot t^2$$

und für die Endgeschwindigkeit

$$v = a \cdot t = \frac{m_2 \cdot g}{m_1 + m_2} \cdot t$$

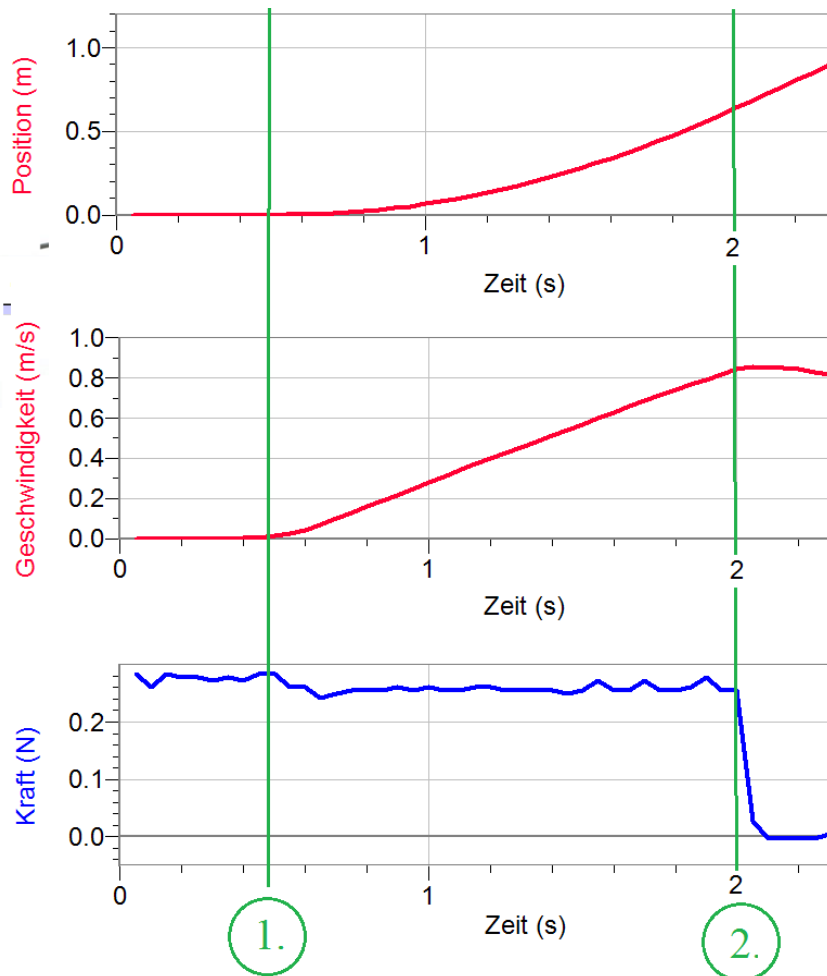
Zur Durchführung dieses Experiments benutzen wir die Fahrbahn DTS-EC bzw. DTS-EC-LONG, einen Experimentierwagen DTS-CART-MEC mit Wegdecoder und einen Kodierempfänger MEC-BTD. Auf dem Experimentierwagen ist ein Dual-Range-Force-Sensor DFS-BTA oder ein Wireless Dynamic Sensor WDSS (Figur 25) befestigt. Auf der Fahrbahn wird links der Kodierempfänger, rechts das Speichenrad (Ultra Pulley Attachment SPA) mit der Befestigungsklammer (Pulley Bracket B-SPA) montiert (Figur 44). Die in Figur 44 abgebildete Lichtschranke wird nicht verwendet.



Figur 43: Experimentierwagen DTS-CART-MEC mit Kraftsensor DFS-BTA



Figur 44: Ultra Pulley Attachment SPA mit Pulley Bracket B-SPA und Lichtschranke



Wagenmasse
(mit Kraftsensor)
 $m_1 = 420 \text{ g}$

Masse des
Hakengewichts
 $m_2 = 28 \text{ g}$

- ① Start
- ① bis ② beschleunigte Bewegung
- ab ② gleichförmige Bewegung

Figur 45: Weg-, Geschwindigkeit- und Kraft-Zeit-Diagramme des Experiments zum 2. Newtonschen Gesetz

Kodierempfänger und Kraftsensor werden mit dem Datenlogger (LabPro, LabQuest) verbunden. Der Datenlogger wird mit einem USB- (mini/A) Kabel an einem Computer angeschlossen und das Datenerfassungsprogramm (Logger Pro 3.11) gestartet. Der Decoderwagen wird zum Decodierempfänger bewegt; dann werden die Längenmessung und der Kraftsensor auf null eingestellt (Logger Pro: Versuch => Auf null stellen => Encoderwagen, Kraftsensor umschaltbar). Am Haken des Kraftsensors DFS-BTA wird ein starker Faden befestigt, über die (horizontale!) Fahrbahn gespannt, um das Speichenrad (Ultra Pulley) gelegt und mit einer Schlaufe am Hakengewicht befestigt. Der Experimentierwagen wird jetzt zum Decodierempfänger bewegt; die Messung wird gestartet (Logger Pro: Starten) und der Wagen wird losgelassen. Das Programm Logger Pro zeichnet jetzt automatisch drei Diagramme, ein Weg-, ein Geschwindigkeit- und ein Kraft-Zeit-Diagramm auf (Figur 45).

Die Bewegung des Experimentierwagens verläuft zwischen den beiden grünen vertikalen Linien (Figur 45) beschleunigt, das Weg-Zeit-Diagramm parabelförmig gemäss $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$, das

Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm geradlinig gemäss $v = a \cdot t$. Die auf den Experimentierwagen in dieser Bewegungsphase wirkende, beschleunigende Kraft $F = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot m_2 \cdot g$ ist konstant. Solange der

Wagen beim Kodierempfänger ruht, wirkt auf den Kraftsensor das ganze Gewicht $m_2 \cdot g$ des Hakengewichts.

Der Abfall beim Start von $m_2 \cdot g = 0.028 \cdot 9.81 \text{ N} \approx 0.275 \text{ N}$ auf

$$\frac{m_1}{m_1+m_2} \cdot m_2 \cdot g = \frac{0.42}{0.42+0.028} \cdot 0.028 \cdot 9.81 \text{ N} \approx 0.258 \text{ N}$$

ist im Kraft-Zeit-Diagramm (Figur 45, blaues Diagramm) erkennbar. Der Effekt wird verstärkt, wenn die Masse des Hakengewichts bei gleichbleibender Masse des Experimentierwagens vergrößert wird.

Die experimentellen Beschleunigungswerte können mit einer Regressionsanalyse (Logger Pro, TI-Nspire™ oder EXCEL) der Weg-Zeit sowie der Geschwindigkeit-Zeit-Daten ermittelt und mit dem

theoretischen Wert $a = \frac{m_2 \cdot g}{m_1+m_2} = \frac{0.028 \cdot 9.81 \text{ m}}{0.42+0.028 \text{ s}^2} = 0.613 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ verglichen werden.

Abweichungen können mit Reibungseffekten der nicht ganz idealen Wagenräder sowie der nicht berücksichtigten Bewegung des Speichenrads (Ultra Pulley) erklärt werden. Die Masse des Fadens kann vernachlässigt werden. Reibungseffekte können durch leichtes Schrägstellen der Bahn kompensiert werden.

Sobald keine beschleunigende Kraft mehr wirkt (Figur 45, ab 2.), müsste die Geschwindigkeit konstant bleiben. Das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm zeigt eine leichte Abnahme, die wahrscheinlich auf die bremsende Wirkung des Kraftsensor-Kabels zurückzuführen ist. Wenn dieser Effekt eine Rolle spielt ist ein drahtloser Kraftsensor (Wireless Dynamic Sensor WDSS) vorzuziehen.

6.2 Stossexperimente: Impuls, Kraftstoss, Impulssatz

Quantitative Stossexperimente können sehr einfach mit dem Encoder Carts DTS-CART-MEC und dem Plunger Cart DTS-CART-P auf der Vernier Fahrbahn DTS-EC oder DTS-EC-LONG durchgeführt werden. Dieses Material ist im Lieferumfang des Dynamic Cart an Track Systems DTS-EC enthalten.

Um die Distanzdaten **beider** Experimentierwagen simultan erfassen zu können sind aber ein zusätzlicher Kodierempfänger (Motion Encoder Receiver MEC-BTD) sowie ein Motion Encoder Cart Upgrade Kit MECT für den Plunger Cart DTS-CART-P erforderlich.

Mit dieser Ausrüstung sind die folgenden drei quantitativen Stossexperimente möglich:

a) **Vollkommen (vollständig) inelastischer Stoss**

Ein Stoss heisst dann *vollkommen inelastisch*, wenn sich die beiden Körper *nach* dem Stoss mit der gleichen Geschwindigkeit \vec{v}' gemeinsam weiterbewegen: $\vec{v}_1' = \vec{v}_2' = \vec{v}'$.



Gemäss Impulssatz gilt dann:

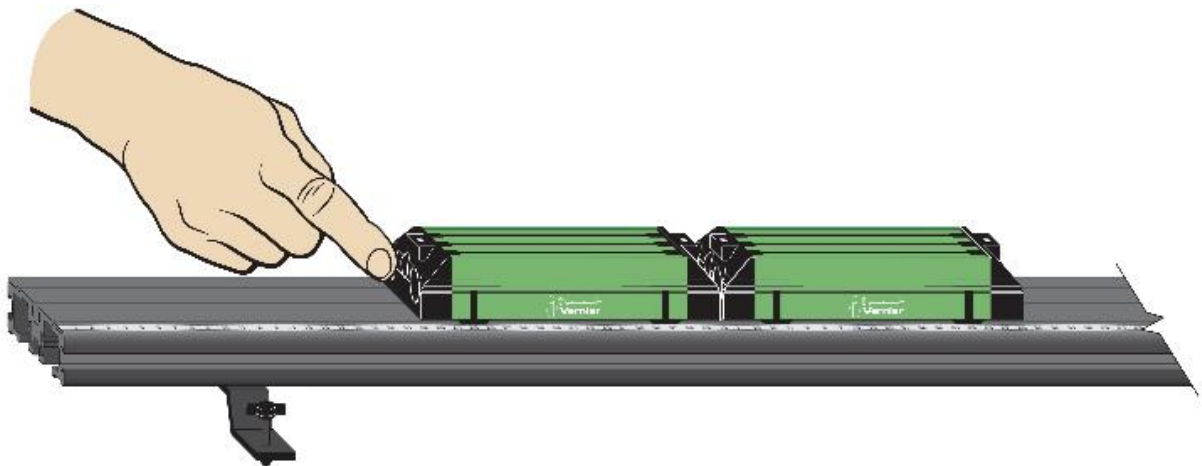
$$m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 = m_1 \cdot \vec{v}' + m_2 \cdot \vec{v}' \quad \text{oder} \quad \underline{\underline{\vec{v}' = \frac{m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2}{m_1 + m_2}}}$$

Bei einem vollständig inelastischen Stoss wird ein grosser Teil der kinetischen Energie der stossenden Körper zuerst in Deformationsarbeit und dann in Wärme umgewandelt. Der in Wärme umgewandelte Anteil der kinetischen Energie beträgt gemäss Energiesatz:

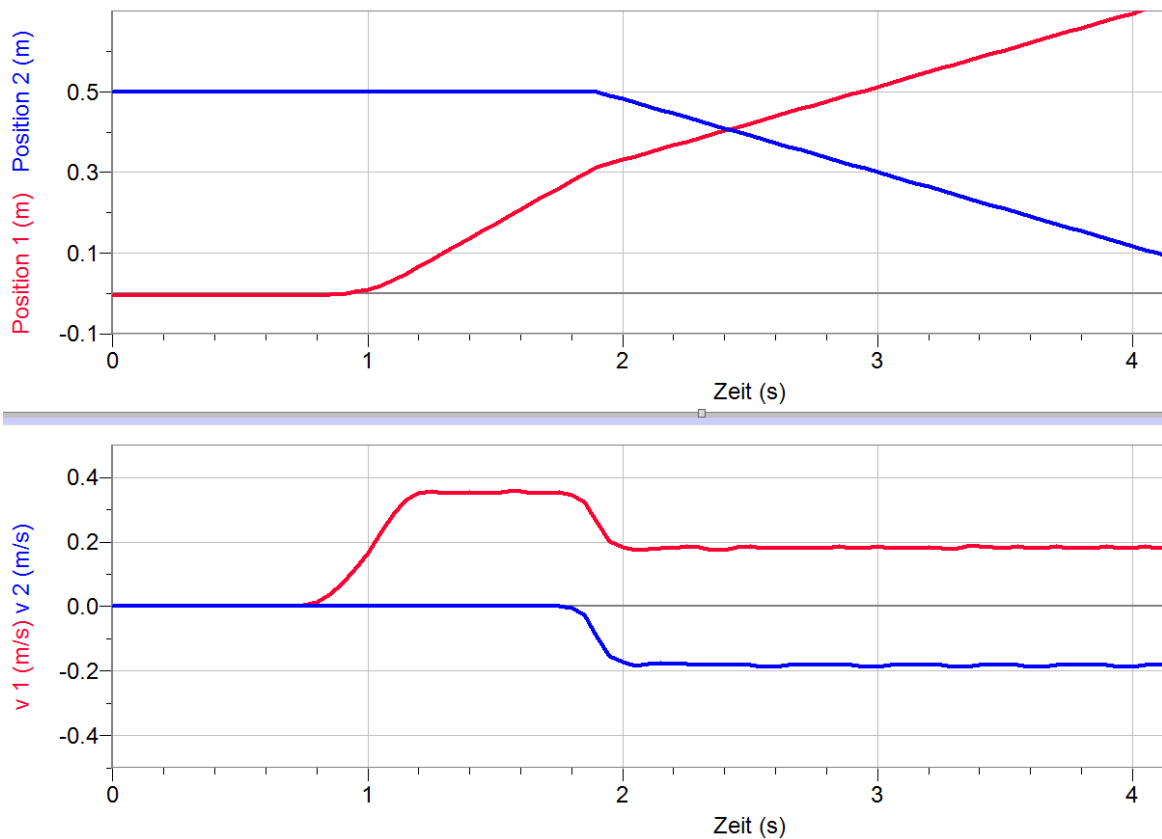
$$\Delta W = W_{\text{vorher}} - W_{\text{nachher}} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot (m_1 + m_2) \cdot v'^2$$

Es lässt sich zeigen, dass bei dieser Stossart ein Maximum an kinetischer Energie in Wärme umgesetzt wird.

Auf der Fahrbahn DTS-EC oder DTS-EC-LONG wird der **vollständig inelastische Stoss** zwischen zwei Experimentierwagen mithilfe von Klettverschlussklebern (Velcro hook & pile tabs) an den Stossstellen der beiden Experimentierwagen realisiert. Der eine Wagen wird dabei von Hand leicht angestossen (Figur 51), trifft dann auf den zweiten, ruhenden Wagen und bewegt sich mit diesem dann gemeinsam weiter. Figur 52 zeigt das Messresultat eines solchen Stosses.



Figur 51: vollständig inelastischer Stoss mit Klettverschlüssen (Velcro hook&pile tabs) an den Kontaktstellen der beiden Experimentierwagen (ältere Version)



Figur 52: vollkommen inelastischer Stoss auf der DTS-EC-Fahrbahn. Wagen 1 (stossend): rot, Wagen 2 (zu Beginn ruhend): blau. Nach dem Stoss: gemeinsame Weiterfahrt.

b) Vollkommen (vollständig) elastischer, zentraler Stoss

Ein Stoss heisst vollständig elastisch, wenn die gesamte kinetische Energie der beiden stossenden Körper erhalten bleibt, also keine Energie in Wärme umgesetzt wird. Der vollständig elastische Stoss ist das extreme Gegenstück zum vollständig inelastischen Stoss, bei welchem ein Maximum an kinetische Energie in Wärme umgesetzt wird. Zentral heisst der Stoss dann, wenn sich die stossenden Körper vor, während und nach dem Stoss auf derselben Geraden (Zentralen) bewegen: Wir können den Impulssatz in diesem Spezialfall (aber nur in diesem!) ohne Vektorzeichen aufschreiben.



Die zugehörigen Gleichungen, der Impulserhaltungssatz und die Beziehung für die Erhaltung der kinetischen Energie lauten für den vollständig elastischen, zentralen Stoss:

$$m_1 * v_1 + m_2 * v_2 = m_1 * v_1' + m_2 * v_2'$$

$$\frac{1}{2} * m_1 * v_1^2 + \frac{1}{2} * m_2 * v_2^2 = \frac{1}{2} * m_1 * v_1'^2 + \frac{1}{2} * m_2 * v_2'^2$$

Dieses Gleichungssystem ist nach den beiden unbekanntem Geschwindigkeiten v'_1 und v'_2 aufzulösen. Da die eine der beiden Gleichungen quadratisch in v'_1 und v'_2 ist, wird die Lösung mühsam. Mit einem einfachen Trick lässt sich aber aus den beiden obigen Gleichungen eine weitere lineare Gleichung gewinnen, so dass schliesslich nur noch ein lineares Gleichungssystem gelöst werden muss.

Eine einfache Umstellung des Gleichungssystems liefert:

$$\begin{aligned}m_1 * (v_1 - v'_1) &= m_2 * (v'_2 - v_2) \\m_1 * (v_1^2 - v'^2_1) &= m_2 * (v'^2_2 - v_2^2)\end{aligned}$$

Anwendung der dritten binomischen Formel:

$$\begin{aligned}m_1 * (v_1 - v'_1) &= m_2 * (v'_2 - v_2) \\m_1 * (v_1 + v'_1) * (v_1 - v'_1) &= m_2 * (v'_2 + v_2) * (v'_2 - v_2)\end{aligned}$$

Die Division der unteren Gleichung durch die obere liefert:

$$v_1 + v'_1 = v'_2 + v_2$$

Damit müssen wir nun noch das lineare Gleichungssystem berechnen:

$$\begin{aligned}m_1 * v_1 + m_2 * v_2 &= m_1 * v'_1 + m_2 * v'_2 \\v_1 + v'_1 &= v'_2 + v_2\end{aligned}$$

Eine kurze Rechnung (bitte selber nachprüfen) ergibt:

$$\begin{aligned}v'_1 &= \frac{v_1 * (m_1 - m_2) + 2 * m_2 * v_2}{m_1 + m_2} \\v'_2 &= \frac{v_2 * (m_2 - m_1) + 2 * m_1 * v_1}{m_1 + m_2}\end{aligned}$$

Ist der zweite Körper (Masse m_2) zu vor dem Stoss in Ruhe ($v_2 = 0$), so vereinfachen sich die Formeln:

$$\begin{aligned}v'_1 &= \frac{v_1 * (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} \\v'_2 &= \frac{2 * m_1 * v_1}{m_1 + m_2}\end{aligned}$$

Im Folgenden untersuchen wir einige interessante Spezialfälle:

1. Zweiter Körper leichter als erster: $m_2 < m_1$

Es gilt: $v'_1 > 0$ und $v'_2 > 0$. Bedeutung?

2. Zweiter Körper gleich schwer wie erster: $m_2 = m_1$

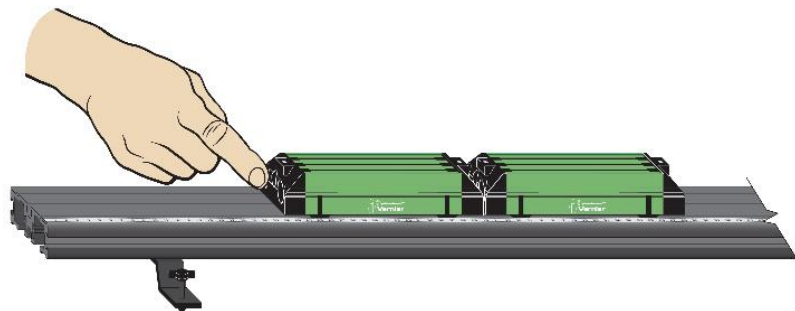
Es gilt: $v'_1 = 0$ und $v'_2 = v_1$.

In diesem Fall vertauschen die beiden Körper beim Stoss ihre Geschwindigkeiten.

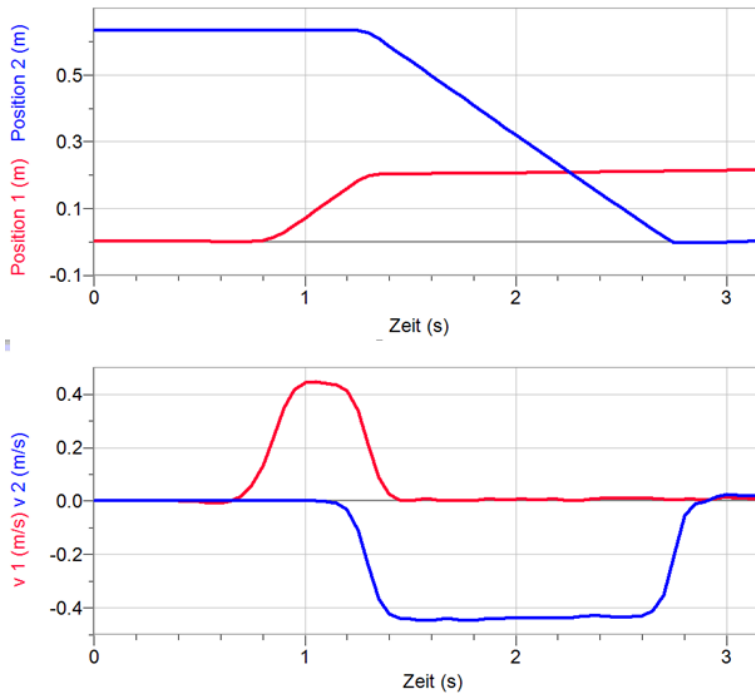
3. Zweiter Körper schwerer als erster: $m_2 > m_1$

Es gilt: $v'_1 < 0$ und $v'_2 > 0$. Bedeutung?

Auf der Fahrbahn DTS-EC oder DTS-EC-LONG erfolgt der **vollständig elastische Stoss** zwischen zwei Experimentierwagen mithilfe von abstossenden (N-N) Supermagneten (Neodym) an den Stossstellen der beiden Experimentierwagen. Die oben erwähnten drei Spezialfälle können mithilfe der mitgelieferten 125 Gramm-Massenstücke (Mass DTS) realisiert werden. Diese Massenstücke können in die Massenbehälter (Mass Trays) der Experimentierwagen gelegt werden. So kann die Masse der Experimentierwagen zwischen ca. 300 und 800 Gramm verändert werden. Der eine Wagen wird dabei von Hand leicht angestossen (Figur 53), trifft dann auf den zweiten, ruhenden Wagen. Beide bewegen sich dann mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten weiter. Figur 54 zeigt das Messresultat eines solchen Stosses.



Figur 53: vollständig elastischer Stoss mit abstossender (Nord-Nord) Supermagnete (Neodym) an den Kontaktstellen der beiden Experimentierwagen (ältere Version)



Figur 54: vollkommen elastischer Stoss auf der DTS-EC-Fahrbahn.

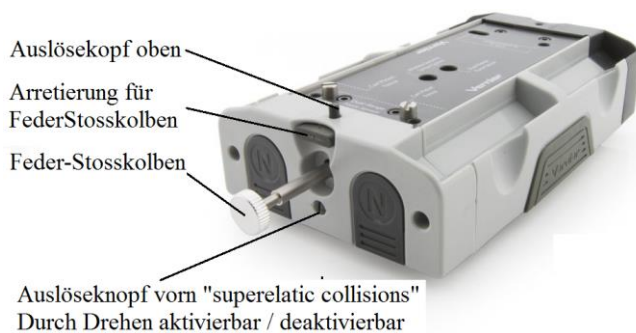
Vor dem Stoss:
 Wagen 1 (stossend): rot,
 Wagen 2 (zu Beginn ruhend): blau.

Nach dem Stoss:
 Wagen 1: rot; in Ruhe,
 Wagen 2: blau; bewegt sich mit der ursprünglichen Geschwindigkeit des Wagens 1 weiter (Geschwindigkeits.austausch).

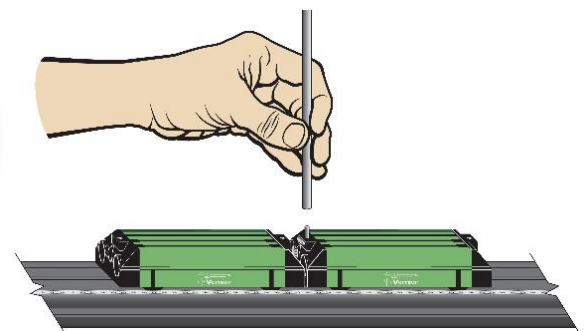
c) Stoss mit Gesamtimpuls null

Der Experimentierwagen «Plunger Cart DTS-Cart-P» verfügt über einen regulierbaren Feder-Stoss-kolben, der entweder von oben oder von vorn von einem zweiten Experimentierwagen ausgelöst werden kann («superelastic collision», Figuren 55 und 56). Zwei ruhende Experimentierwagen können dank dieser Vorrichtung in entgegengesetzter Richtung bewegt werden. Dabei ist der vektorielle Gesamtimpuls vor, während und nach dem Stoss null:

$$\vec{p}_{\text{total}} = \vec{p}_{1,\text{vor}} + \vec{p}_{2,\text{vor}} = \vec{p}_{1,\text{nach}} + \vec{p}_{2,\text{nach}} = \vec{0}$$

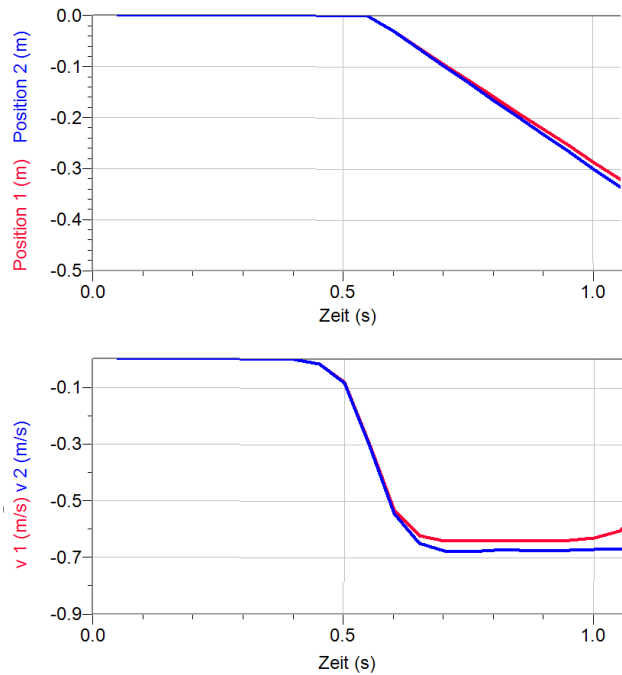


Figur 55: Experimentierwagen «Plunger Carts DTS-Cart-P»



Figur 56: Stoss mit Gesamtimpuls null: Auslösung von oben

Figur 57 zeigt das Messresultat eines solchen Stosses.



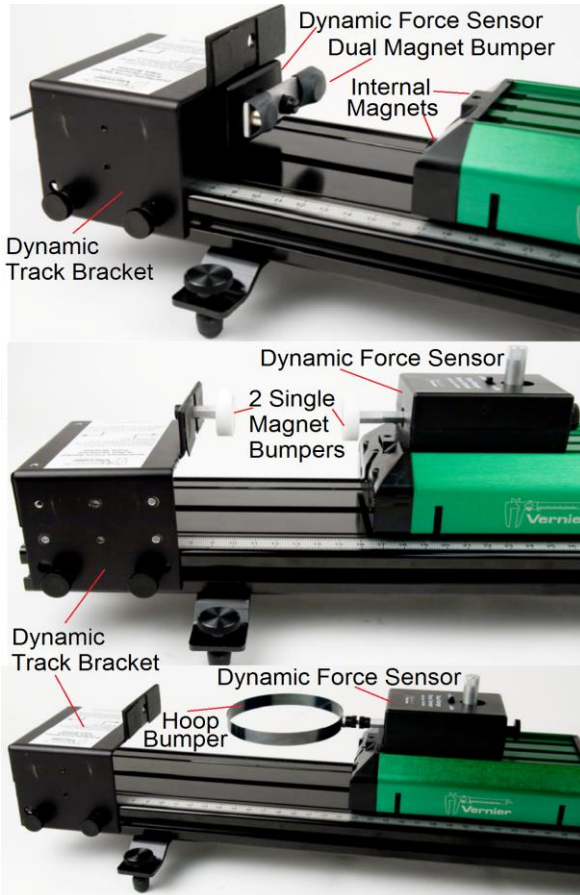
Figur 57: Stossesperiment mit Gesamtimpuls null. Die beiden Wagen sind zuerst in Ruhe und bewegen sich dann entgegengesetzt mit gleichem Impulsbetrag von einander weg.

6.3 Impuls, Kraftstoss, 3. Newton'sches Gesetz, Potenzielle, kinetische und elastische Energie

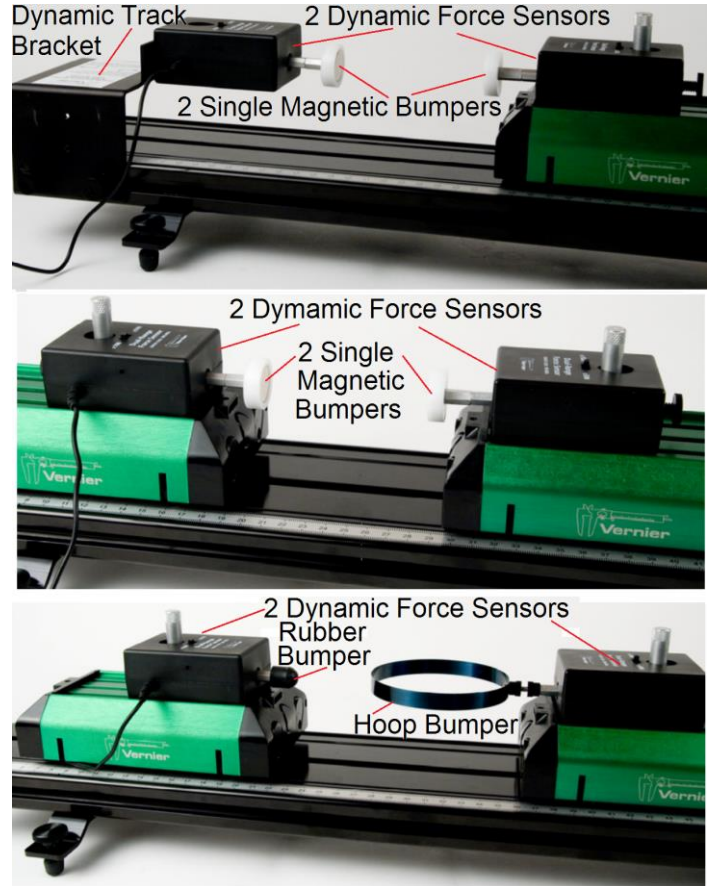
Mithilfe des Bumper und Launcher Kits BLK (Figur 30, nicht im Lieferumfang enthalten) sind weitere Experimente zu Impuls und Kraftstoss sowie quantitative Experimente zur Energieumwandlung Federenergie => kinetische Energie => potenzielle Energie auf der Fahrbahn möglich.

Das Längenmesssystem der Fahrbahn wird dabei zur exakten Bestimmung von Positionen (Federdeformation) und Geschwindigkeiten eingesetzt.

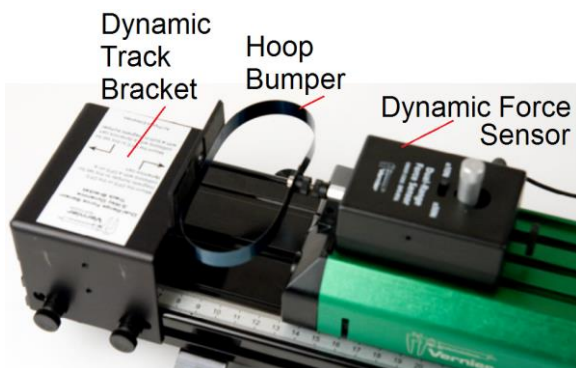
Um Experimente durchzuführen wird die Halteklammer, die «Dynamic Track Bracket» des BLK mit der Fahrbahn verbunden und der oder die Kraftsensoren auf der Halteklammer oder dem / den Experimentierwagen montiert (Figuren 46 und 47, noch mit den älteren Experimentierwagen). Die nachfolgenden Figuren 46 – 49 zeigen den Einsatz des nützlichen Materials im «Bumper and Launcher Kit» BLK zusammen mit Fahrbahn, Experimentierwagen und «Dual Force Sensor» DFS.

Experimente zu Impuls und Kraftstoss
Experimente zum 3. Newton'schen Gesetz


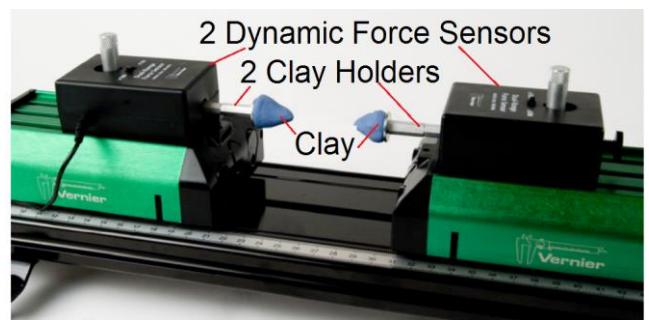
Figur 46: Messung des Kraftstosses $F=F(t)$ zwischen Wagen und fester Wand mit Magneten (oben und Mitte) und Blattfeder. Je mit einem Kraftsensor.



Figur 47: Messung «actio=reactio» zwischen bewegtem und ruhendem Magnet-Puffer (oben), zwischen zwei bewegten Magnetpuffern (Mitte) sowie einer Blattfeder und einem festen Gummi-Puffer. Je mit zwei Kraftsensoren.



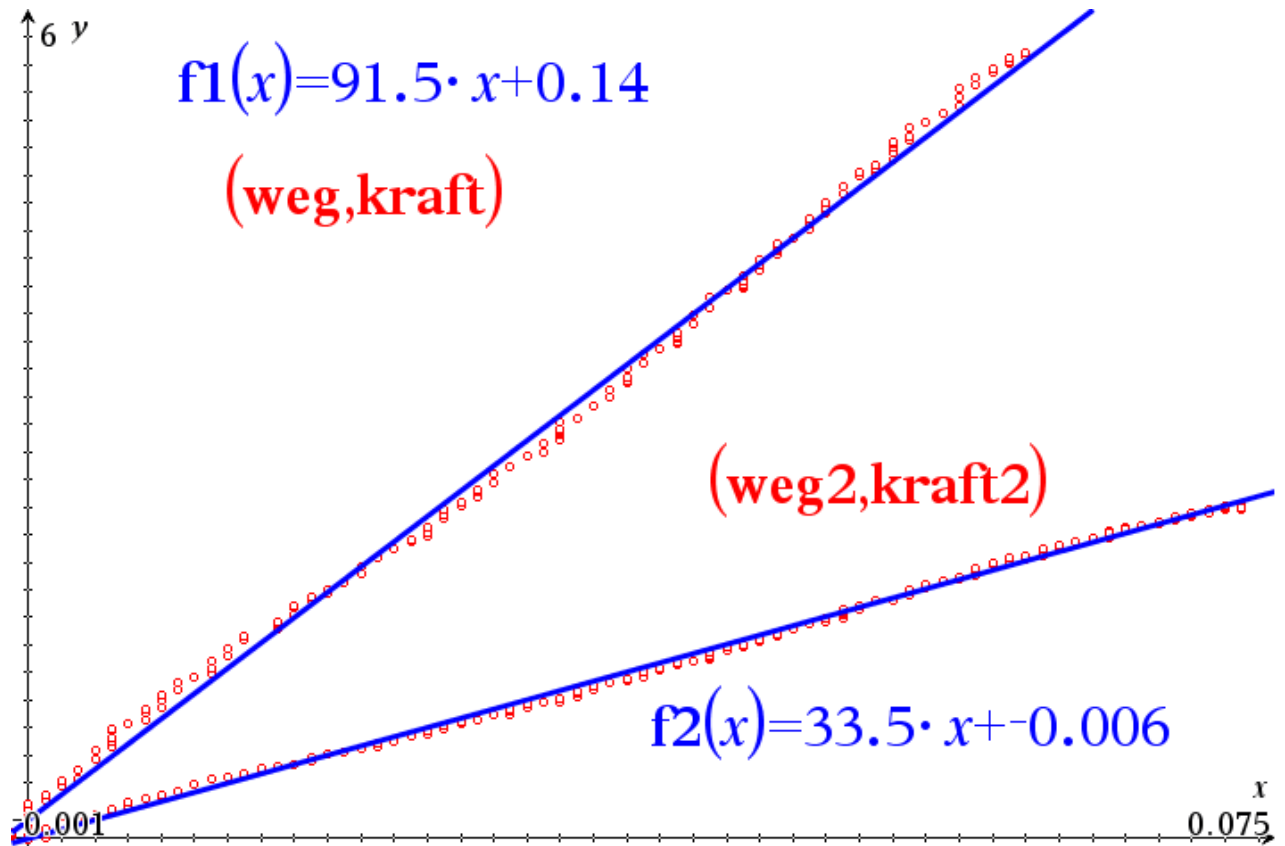
Figur 48: Elastische Deformation. Messung zum Federgesetz (Hooke'sches Gesetz)



Figur 49: «Actio=Reactio» Messung anhand eines inelastischen Stosses mit Plastilin-Masse (Clay)

Figur 50 zeigte das Arbeits-Diagramm (Kraft-Weg-Diagramm) der beiden im «Bumper and Launcher Kit» mitgelieferten Blattfedern (Hoop Bumpers»). In Ordinaten-Richtung ist die Kraft bis 6 Newton, in Abszissen-Richtung die Deformationstrecke bis 7.5 cm (0.075 m) dargestellt (Messungen gemäss Figur 48). Die Kraft wird mit einem «Dual-Range Force Sensor» DFS gemessen, die Distanz mit dem Län-

genmesssystems des Experimentierwagens, auf welchem der DFS montiert ist. Die beiden Federn verhalten sich bis zur vollständigen Deformation nahezu ideal elastisch (lineares Kraft-Weg-Diagramm). Die Regressionsberechnung (Nspire CAS) liefert einen Wert von $91.5 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ für die härtere, $33.5 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ für die weichere der beiden Federn.



Figur 50: Arbeitsdiagramm (Kraft-Weg-Diagramm) von zwei Blattfedern (201 Messpunkte)

Diese Blattfedern erlauben quantitative Experimente zum Thema Energieumwandlung auf der Fahrbahn. (Federenergie \leftrightarrow kinetische Energie \leftrightarrow potenzielle Energie). Eine detaillierte Beschreibung findet sich in:

Larry Duckerich [LD], Advanced Physics with Vernier – Mechanics, 2011, Kapitel 7, 8 und 9.

Literatur: Larry Duckerich [LD], Advanced Physics with Vernier – Mechanics, 2011, ISBN 978-1-929075-64-5