

► **Protokoll einer Rollerfahrt**

Wolfgang Beer

CBL Es ist kein Geheimnis, dass sich Inhalte des Physikunterrichts in der Schule zu selten an für Schüler greifbaren praktischen Beispielen orientieren. Oft fehlt der Platz für die Entfaltung von Eigenkreativität oder das spielerische Entdecken von fachübergreifenden Zusammenhängen. Wenn in der Sekundarstufe II die Grundlagen der Mechanik wiederholt und die Beziehungen zwischen Kinematik und Dynamik geklärt werden, bietet sich mit Roller, Fahrrad oder Moped ein einfacher, aber erstaunlicher Schülerversuch an, der vom Lehrer eigentlich nur noch moderiert werden muss.

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung klingt zunächst sehr einfach: Nehmen Sie das ta-, tv- und ts-Diagramm für eine Rollerfahrt auf. Etwas komplizierter wird die Zusatzbedingung: *Demonstrieren Sie die Ergebnisse unmittelbar nach der Rollerfahrt.*

Erleichternd und verwirrend zugleich sagen wir: Ihnen steht für die Messungen nur ein Beschleunigungssensor zur Verfügung. Es ist natürlich ratsam, wenn die Schülerinnen und Schüler mit den Geräten bereits vertraut sind und die Möglichkeiten der heutigen Taschenrechnergenerationen wenigstens in Ansätzen kennen. Dann ist es nicht undenkbar, dass der eine oder andere Schüler die Versuchsplanung selbst entwickeln kann, denn die ist in wenigen Worten formuliert.

Mit einem Messwerterfassungssystem wird vom Starten bis zum Anhalten einer Rollerfahrt die wirksame Linearbeschleunigung in kleinen Messintervallen aufgenommen. Durch ein- bzw. zweimalige Integration über den gesamten Messzeitraum erhält man das Zeit-Geschwindigkeits- und das Zeit-Weg-Diagramm für den Bewegungsvorgang.

Geräteauswahl leicht gemacht...

CAS – Rechner

Für den hier dargestellten Versuch ist beispielsweise der *Voyage™ 200* optimal geeignet. Wir benötigen einen programmierbaren Grafikrechner mit Listenverarbeitung und Applikation zur Aufnahme von physikalischen Messgrößen (hier: DataMate). Alternativ kann auch der TI-89 Titanium verwendet werden.

Erfassungssystem

Es eignen sich alle TI-kompatiblen Geräte, also das *CBL 2™*, *Vernier LabPro®* oder *Vernier EasyLink®*. Letzteres bietet sich an, wenn der Versuch mit dem Ein-Achs-Beschleunigungssensor LGA-BTA an einer Version des TI-84 oder mit dem TI-Nspire™ durchgeführt wird. Das Erfassungssystem ist klein, handlich und bedarf keiner eigenen Stromversorgung. Es überträgt Messwerte von einem analogen Sensor (BTA-Stecker) an einen TI-Rechner mit Mini-USB-Schnittstelle.



Abb. 1

Prinzipiell eignet sich jeder kompatible Beschleunigungssensor. Ausreichend ist der LGA-BTA (eine Messachse), es kann aber auch der 3D-BTA (drei Messachsen) verwendet werden.

Roller

An seiner Stelle kann natürlich auch ein Fahrrad, ein Moped oder ein Auto verwendet werden. Mit dem Roller lässt sich der Versuch jedoch sogar im Unterrichtsraum durchführen. Bedingt durch die eher „untypische“ Art der Zeit-Weg - Analyse über die Messung der Beschleunigung und einer Minimierung des mathematischen Aufwandes sollte die Bewegung möglichst perfekt linear erfolgen.

Versuchsdurchführung

Der kleine Beschleunigungssensor (27x45x20 mm) ist mit einem sehr flexiblen Anschlusskabel (2,40m) versehen. Er sollte auf der Lenkerachse des Rollers mit Gummibändern befestigt werden. Das bringt die notwendige Stabilität und hinterlässt an den Geräten keine unschönen Spuren. Außerdem kann man auf diese Weise den Sensor für die Verwendung ausjustieren. Befestigen Sie den Sensor so, dass die positive x-Achse in Fahrtrichtung zeigt und die Auflageebene des Sensors parallel zur Fahrbahn ist. Der Aufdruck auf dem Sensorgehäuse ist selbsterklärend. Bei Benutzung des Ein-Achs-Sensors „LGA-BTA“ geschieht das Justieren per gutem Augenmaß.

Bei Benutzung des Drei-Achs-Sensors „3D-BTA“ geschieht das Justieren beispielsweise so:

- Sensor an das Erfassungsgerät anschließen, Erfassungsgerät mit dem CAS-Rechner verbinden
- Starten der Applikation „DataMate“
- Kontrollieren der Zahlenwerte für die x- und die y-Achse. Bei senkrecht stehendem Roller wird nun der Sensor so justiert, dass a_x und a_y näherungsweise den Wert Null annehmen.

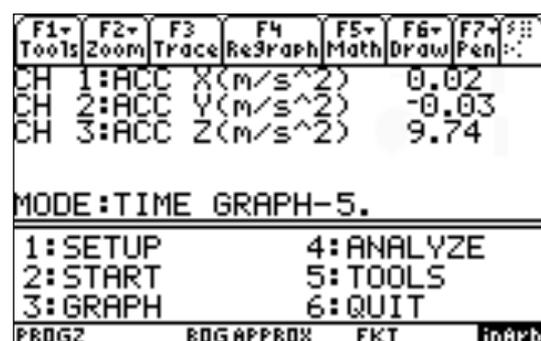


Abb. 2

Nun ist es an der Zeit, eine Probefahrt durchzuführen. Wählen Sie eine hinreichend freie Strecke, auf der Sie aus der Ruhe heraus in mehreren Schüben beschleunigen und anschließend bis auf Null wieder abbremsen können. Messen Sie mit einer Stoppuhr oder durch Zählen die dafür erforderliche Zeit. Je nach freier Wegstrecke ergeben sich 5 bis 10 Sekunden. Es sollte möglich sein, während der Rollerfahrt sowohl das Erfassungsgerät als auch den TI-Rechner gefahrlos mitzunehmen. Achten Sie auf das Anschlusskabel für den Sensor.

Im Programm DATAMATE nehmen Sie nun einige Einstellungen vor: $\boxed{1} \rightarrow \boxed{\text{ENTER}} \boxed{2} \boxed{2} \boxed{.} \boxed{0} \boxed{2} \boxed{\text{ENTER}} \boxed{5} \boxed{0} \boxed{0} \boxed{\text{ENTER}} \boxed{1} \boxed{1}$. Damit weisen wir das Erfassungsgerät an, im Intervall 0,02s über eine Dauer von 10s Beschleunigungswerte für alle belegten Kanäle aufzunehmen.

Stellen Sie oder Ihr Assistent sich in Startposition (alle Geräte fest? a_x -Kabel an CH1?). Mit $\boxed{2}$ wird die Messung gestartet, sie endet automatisch. Fahren Sie sofort los und versuchen Sie erst kurz vor Ende der Messung den Stillstand zu erreichen! (ggf. sind mehrere Durchläufe notwendig). Nach Beendigung der Messung verlassen Sie das Programm DATAMATE mit der Taste $\boxed{6}$ (Speicherorte: Zeiten in L1, a_x in L2). Übernehmen Sie folgende Einstellungen im y-Editor für den Plot 1:

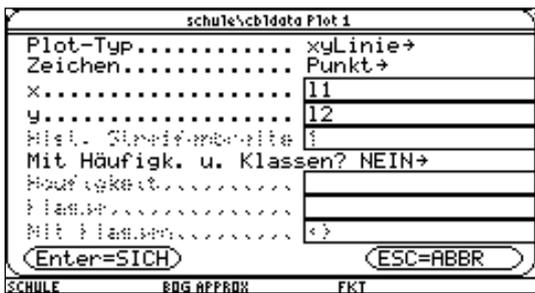


Abb. 3

Aus dieser Situation heraus lassen sich nach Drücken von $\boxed{\text{ENTER}}$ die Messwerte darstellen. Dazu betätigt man $\boxed{F2} \boxed{9}$, um das Koordinatensystem an die Messwerte automatisch anzupassen. Mit Entsetzen registrieren Sie nichts als Mulm, der sich um die Abszissenachse windet:

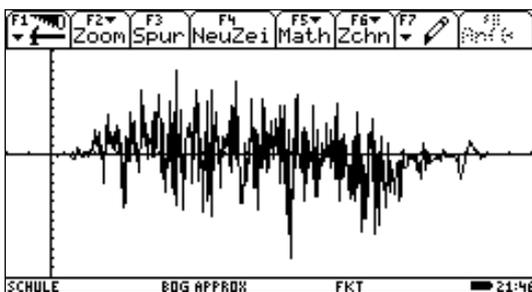


Abb. 4

Doch dieser Mulm zeigt die Wirklichkeit!

Und nun?

Bis hierher hatten wir alle Spaß. Ein verkabelter Wissenschaftler fährt mit dem Roller und hält wieder an. Dann kontrolliert er die Messwerte und führt eine erste Auswertung durch. Wegen

$$v = \frac{ds}{dt} \text{ und } a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$$

erhält man aus den Messwerten der Beschleunigung a_x

- durch einmalige Integration die Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von t .
- durch zweimalige Integration den Weg s in Abhängigkeit von t .

Der Taschenrechner bietet jedoch ohne weiteres keine Möglichkeit, zugehörige Integralfunktionen zu zeichnen, wenn die Funktion nicht bekannt ist. „Leider“ haben wir nichts anderes als eine gigantische Wertetabelle.

Die Idee

Das Plotten der Integralfunktion ist in unserem Fall nichts anderes als die grafische Darstellung der Beträge von Flächeninhalten schmaler Rechtecke und deren Aufaddierung. Das ist doch kein Problem!

- Unsere Zeitintervalle haben die gleiche Länge.
- Wir bilden den Mittelwert aus dem linksseitigen und rechtsseitigen Messwert am Intervall.
- Wir berechnen mit diesem Mittelwert für dieses Intervall hinreichend genau die Fläche unter der Kurve.
- So verfahren wir mit jedem Teilintervall, wobei das vorherige Ergebnis immer mit addiert wird. Dann gehört zu jedem Intervall eine bestimmte Fläche. Wir integrieren quasi grafisch.

Es ist an der Zeit, den Programm-Editor des Rechners zu verwenden, denn diese Prozedur können wir ja kaum einem menschlichen Rechenknecht zumuten. Das nachfolgende Programm können Sie direkt in den Programm-Editor übernehmen.

Listing Programm integral()

```

integral()
PrgmClrIO
Disp "Es sei L eine Messgröße, deren Werte"
Disp "in der Liste L11 stehen."
Disp "Zugehörige Zeiten bitte in L1."
Disp "Neue Zeitliste: L10"
Disp "In L12 speichere ich die Werte dL*dt"
Disp ""
Disp "--> Weiter."
Pause
ClrIO
Disp "Der Datengraph von L11 sollte"
Disp "VOR Ausführung symmetrisch zur"
Disp "x-Achse verlaufen!"
Disp ""
Disp "Starten mit Enter."
Disp "Abbruch mit ON"
Pause
Dim(L1) → n
DelVar L10,L12
L1[2]-L1[1] → dt
0 → s
0 → L12[1]
L1[1] → L10[1]
For k,2,n
L1[k] → L10[k]
1/2*(L11[k-1]+L11[k])*dt → h
    
```

```

h+l12[k-1]→l12[k]
s+h→s
EndFor
DelVar k,dt,h
ClrIO
Disp "Fläche (Näherungswert):",s
Disp ""
Disp "Programm-Ende. Press F5."
EndPrgm
    
```

Versuchsabschluss

Die Zeitpunkte der Messung stehen derzeit noch in L1, die Messwerte in L2. Um die Originaldaten nicht zu überschreiben, kopieren wir die Liste L2 mit „L2 [STO] L11“ in Liste 11. Nach Durchlaufen des Programms integral() wird eine Liste L12 erzeugt, in der die zugehörigen Integrale stehen, in unserem Fall also die Geschwindigkeit. Die grafische Darstellung der Geschwindigkeit erfolgt durch die Definition von Plot2 in ähnlicher Weise wie weiter oben beschrieben (x: L1; y: L12). Erzeugen Sie ggf. von L12 eine Sicherungskopie in L3.



Abb. 5

Aus dem rauschenden Wollknäuel der eigentlichen Messwerte ist nun eine tv-Kurve geworden, in der man sogar das Anschieben mit dem Bein (und v_{max}) deutlich erkennen kann.



Abb. 6

Ein weiterer Durchlauf des Programms nach dem Befehl L12 [STO] L11 erzeugt uns den Zeit-Weg - Zusammenhang, dessen Grafik dann so aussieht:

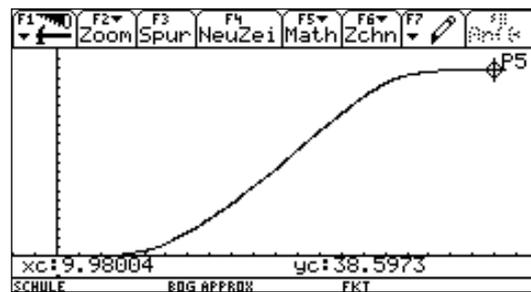


Abb. 7

Aus dem Schrecken von einst ist nun ein Staunen geworden. Das ts-Diagramm entspricht den Erwartungen. Im dargestellten Fall wurde eine Fahrstrecke von 38,60 m gemessen, tatsächlich waren es 38,10 m. Ich glaube, da kann man auch ohne Fehlerbetrachtung und Fehlerberechnung zufrieden sein.

Autor

Wolfgang Beer, Gera (D)
 Goethe-Gymnasium-Rutheneum seit 1608, Gera
info@wolfgangbeer.de