

Physik an Fahrzeugen

Michael Roser (Hrsg.)



Teachers Teaching with Technology™



Herausgeber:
Michael Roser

Autoren:
Jörg Bussmann, Stefan Christoph, Volker Fachinger, Irma Mgeladze, Matthias Müller, Roland Pflöging, Michael Roser, Ralph Schimmack

Dieses und weiteres Material steht Ihnen zum pdf-Download bereit: www.t3europe.eu sowie unter www.ti-unterrichtsmaterialien.net

Dieses Werk wurde in der Absicht erarbeitet, Lehrerinnen und Lehrern geeignete Materialien für den Unterricht in die Hand zu geben. Die Anfertigung einer notwendigen Anzahl von Fotokopien für den Einsatz in der Klasse, einer Lehrerfortbildung oder einem Seminar ist daher gestattet. Hierbei ist auf das Copyright von T³-Deutschland hinzuweisen. Jede Verwertung in anderen als den genannten oder den gesetzlich zugelassenen Fällen ist ohne schriftliche Genehmigung von T³ nicht zulässig.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
1. Beschleunigen	2
1. 1. Auto mit Schaltgetriebe	2
1. 2. PKW mit Automatikgetriebe	4
1. 3. Motorrad mit Doppelkupplungsgetriebe.....	4
1. 4. Straßenbahn.....	5
1. 5. Flugzeug	5
2. Bremsen	6
3. Zentripetalbeschleunigung beim Fahren im Kreis	9
4. Motor	11
4. 1. Anlasserstrom – Indirekte Messung großer Ströme.....	11
4. 2. Autoabgase – Messung des CO ₂	13
4. 3. Drehzahlmessungen mittels Mikrofonsensor.....	15
5. Messung des Luftwiderstandes mit Hilfe eines PKWs.....	17
6. Fensterheber, Öffnen von Tür und Kofferraumdeckel	20
7. Unfallsimulationen – Crashtest.....	23
8. Schwingungsdämpfer	28

Vorwort

Das Themenheft „Physik an Fahrzeugen“ versucht, verschiedene physikalische Phänomene zu bündeln. Wir haben das Auto – oder im weiteren Sinne Fahrzeuge – gewählt, weil dies sowohl der Interessenslage der Autoren, als auch der der Jugendlichen entgegenkommt. Das Auto ist technisch relativ komplex und liefert deshalb viele Ansatzpunkte für verschiedene Teilgebiete der Physik.

Die mobile digitale Messwerterfassung bietet trotz ihrer Komplexität die Möglichkeit, dass die Lernenden – auch schon in der Mittelstufe – direkt am realen Objekt messen können. Somit erhalten sie Zugang zum Verständnis bestimmter Vorgänge in einem Fahrzeug und den daraus resultierenden Folgen.

Für die in diesem Heft beschriebenen Messungen sind grundlegende Erfahrungen im Umgang mit Messsystemen notwendig. Auf eine Einführung in das Messen wurde zu Gunsten der Struktur verzichtet. Einen guten Einstieg bietet das Heft „Schülerexperimente im Physikunterricht mit digitaler Messwerterfassung, Die Top 13: Sicheres Gelingen – hoher Lernerfolg“.

Die dargestellten Experimente versuchen an die Erfahrungen der Lernenden anzuknüpfen und sie in den Unterricht einzubeziehen. Die Eigentätigkeit wird dabei gestärkt, weil in den meisten Fällen die Versuche so angelegt sind, dass die Messungen und Auswertungen von den Lernenden selbst durchgeführt werden können.

Das Auto als außerschulischer Lernort kann zusätzlich die Motivation der Lernenden für das Fach Physik steigern. Dadurch gelingt es, den Physikunterricht abwechslungsreich, realitätsnah und kontextbezogen zu gestalten.

Bei den vorgestellten Versuchen wurde exemplarisch das Messerfassungssystem von Texas Instruments und Vernier verwendet. Viele Versuche lassen sich aber auch mit anderen Sensoren oder sogar einem Smartphone durchführen.

Die Themenauswahl erlaubt sowohl die Auseinandersetzung mit technischen Aspekten, als auch die Diskussion von Fragen des Umweltschutzes und der Verkehrssicherheit. Darüber hinaus ergeben sich auch Verbindungen zu rechtlichen und gesellschaftspolitischen Themen.

Die vorgestellten Versuche können sowohl als Einzelaspekte im Unterricht vorgestellt werden, gedacht ist es aber als Projektarbeit. Bei der Durchführung als Projekt werden bei den Lernenden insbesondere fachübergreifende und fachverbindende Aspekte gestärkt.

Für einige Versuche ist der Besitz einer Fahrerlaubnis notwendig. Sollten diese Versuche im Straßenverkehr durchgeführt werden, ist besondere Vorsicht walten zu lassen.

1. Beschleunigen

Einleitung / Motivation

Die Idee hinter diesem Kapitel besteht darin, Beschleunigungsvorgänge bei verschiedenen Verkehrsmitteln zu messen und zu vergleichen. Die getroffene Auswahl ist durch die Verfügbarkeit der Fahrzeuge bei der Erstellung dieses Heftes vorgegeben, die Untersuchung lässt sich jedoch leicht auf weitere Fahrzeuge z. B. Elektroautos oder Segways übertragen.

Die realen Vorgänge zeigen häufig vom physikalischen Modell abweichende Situationen, da die idealisierten Modelle der Physik viele Variable nicht einschliessen oder deren Einfluss nur vereinfacht wiedergeben können. Dies trifft besonders auf die Bewegungsvorgänge zu, da hier im Unterricht Luftwiderstand, Reibung, Motor- und Getriebecharakteristik etc. nicht berücksichtigt werden. Die Thematik eignet sich besonders gut, um das erworbene theoretische Wissen anzuwenden, die Abweichungen zu den theoretischen Modellen zu erkennen und diese mindestens ansatzweise zu erklären. Der Aufwand für die eigentlichen Messungen ist relativ gering, da nur ein Beschleunigungssensor notwendig ist.

Die Auswertung wird einmal exemplarisch für einen PKW mit Schaltgetriebe durchgeführt. Da die Auswertungen für die übrigen Fahrzeuge ganz ähnlich verlaufen, sind diese in einer Übersicht zusammengefasst. Zusätzlich zu den erdgebundenen Fahrzeugen wird dann noch das Beschleunigungsverhalten eines startenden Verkehrsflugzeugs untersucht.

1. 1. Auto mit Schaltgetriebe

a) Durchführung des Experiments

Materialliste	Beschleunigungssensor
	Messwerterfassungssystem

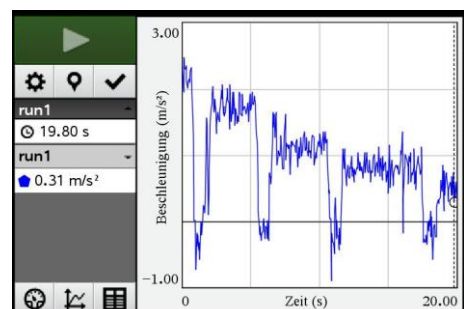
Die Beschleunigung eines Fahrzeugs mit Schaltgetriebe aus dem Stand kann einfach auf einer nicht zu stark befahrenen Strasse mithilfe des Einachsen-Beschleunigungssensors über eine bestimmte Zeit aufgenommen werden, indem der Sensor an einer geeigneten Stelle montiert wird, z. B. mit einem zweiseitigen Klebeband an einer der Seitenscheiben, (vgl. Abb.). Die Messzeit richtet sich nach dem verwendeten Fahrzeugtyp und den äusseren Gegebenheiten. Die Messung sollte zeitbasiert mit einer Messdauer von ca. 20 Sekunden bei 20 bis 25 Messungen pro Sekunde erfolgen.



b) Auswertung der Messdaten

a-t-Diagramm

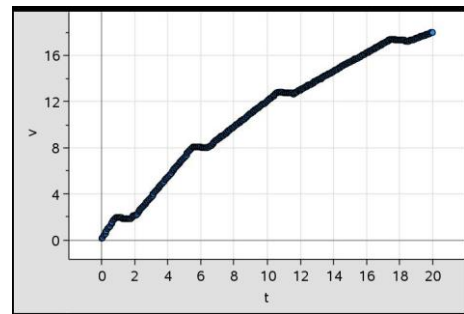
Das Messwert-Diagramm zeigt den Verlauf der Beschleunigungsmessung. Hier sind deutlich die Schaltzyklen zu erkennen, bei denen die Beschleunigung temporär negative Werte annehmen kann. Hier lässt sich für erste Betrachtungen auch eine Regressionsgrade in die Graphik einblenden.



v-t-Diagramm

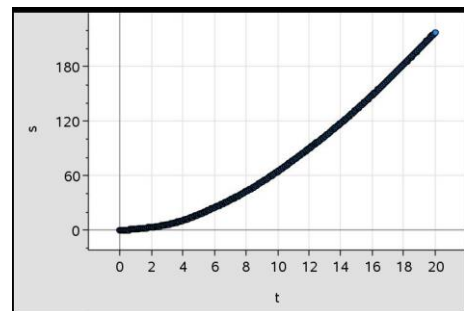
Die gemessenen Beschleunigungsdaten werden nun numerisch integriert und damit das Geschwindigkeits-Zeit- und das Weg-Zeit-Diagramm dargestellt.

Auch hier sind die Schaltzyklen klar erkennbar. Zwischen den einzelnen Zyklen steigt die Geschwindigkeit nahezu linear, wie dies zu erwarten war. Die Geschwindigkeitszunahme nimmt jedoch von Zyklus zu Zyklus ab.



s-t-Diagramm

Auch hier zeigt sich der erwartete Verlauf. Die Schaltzyklen sind hier nicht mehr erkennbar. Dies liegt zum einen daran, dass die Schaltzyklen relativ kurz im Vergleich zu den Beschleunigungsphasen sind und zum andern daran, dass durch die Berechnungen glättende numerische Effekte auftreten.



c) Diskussion und Interpretation

Weshalb treten im a-t-Diagramm negative Werte auf? – *Getriebetrennung, Roll- und Luftwiderstand*

Warum nimmt die Beschleunigung ab? – *Getriebe- und Achsübersetzung*

Gibt es eine Korrelation zwischen der erzielten Beschleunigung und der Getriebeübersetzung?

Dazu kann man den Quotienten der erzielten Beschleunigung und der Getriebeübersetzung (Herstellerangaben im Internet, hier Hyundai I 20 1.6) ermitteln. Im Idealfall sollte der Quotient konstant sein. Bei dieser Beispielmessung trifft dies nur auf den zweiten und dritten Gang zu. Hier beträgt der Quotient etwa 0,83. Die geringeren Quotienten im ersten und vierten Gang (hier ca. 0,64 und 0,77) lassen sich dadurch erklären, dass:

A gang	B beschl	C übers	D qout	E
=			=b[]/c[]	
1	1	2.4	3.769	0.636774
2	2	1.7	2.045	0.831296
3	3	1.14	1.37	0.832117
4	4	0.8	1.036	0.772201
5				
6				

- Beim Anfahren durch den Prozess des Einkuppelns und ggf. durchdrehender Räder nicht die gesamte Kraft auf die Fahrbahn übertragen wurde und
- Beim Beschleunigen im vierten Gang nicht die volle Motorkraft abgerufen wurde, da die Messreihe im öffentlichen Straßenverkehr aufgenommen wurde und hier bereits die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit erreicht war.

Warum verläuft der Graph im v-t-Diagramm in den einzelnen Gängen annähernd linear?

Im einzelnen Gang ist die Übersetzung konstant und der Motor läuft schon im optimalen Drehzahlbereich.

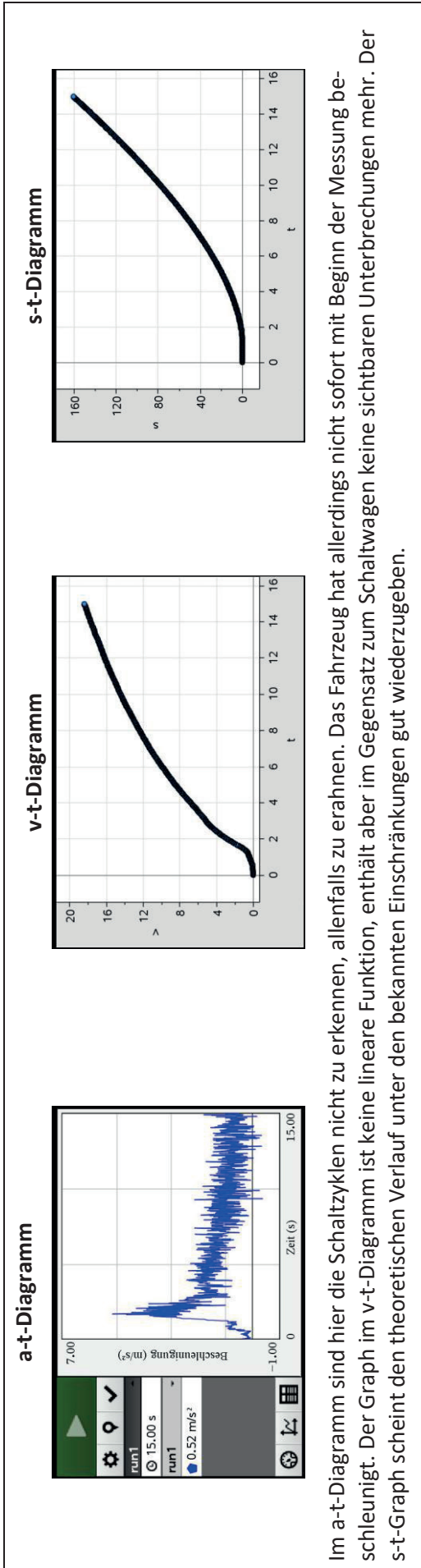
Weshalb nimmt die Steigung mit zunehmendem Gang ab?

Die Kraftübersetzung wird grösser und damit die wirkende Kraft kleiner. Der Luftwiderstand nimmt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zu.

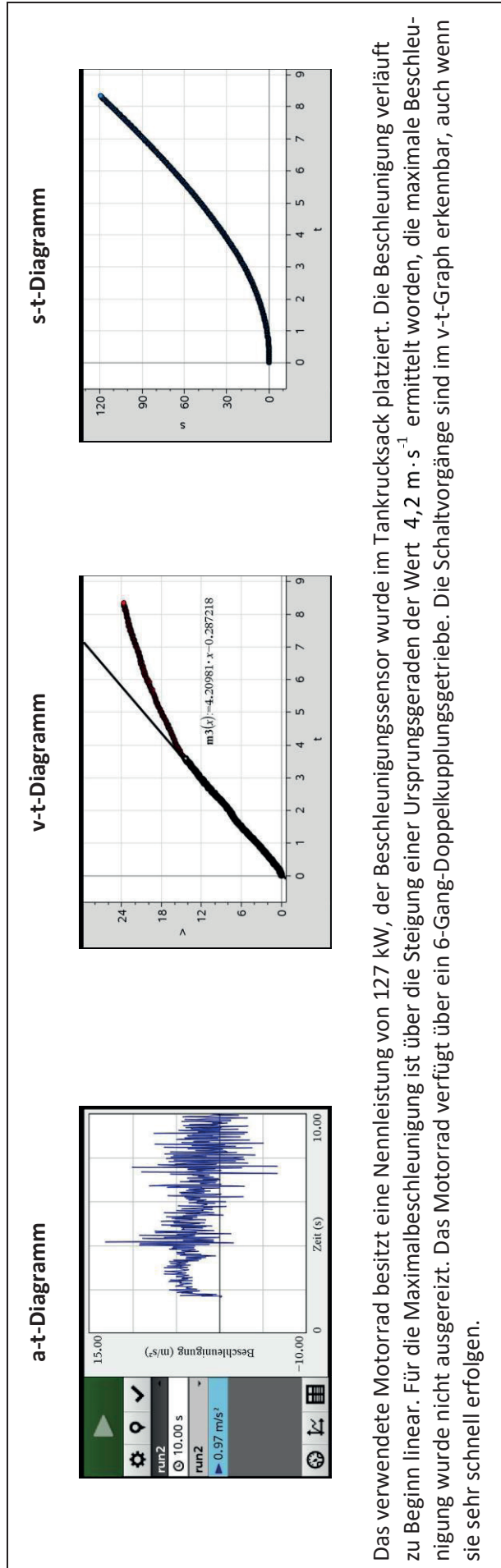
Was passiert mit der Geschwindigkeit während der Schaltvorgänge?

Sie vermindert sich aufgrund des Luft- und Rollwiderstandes.

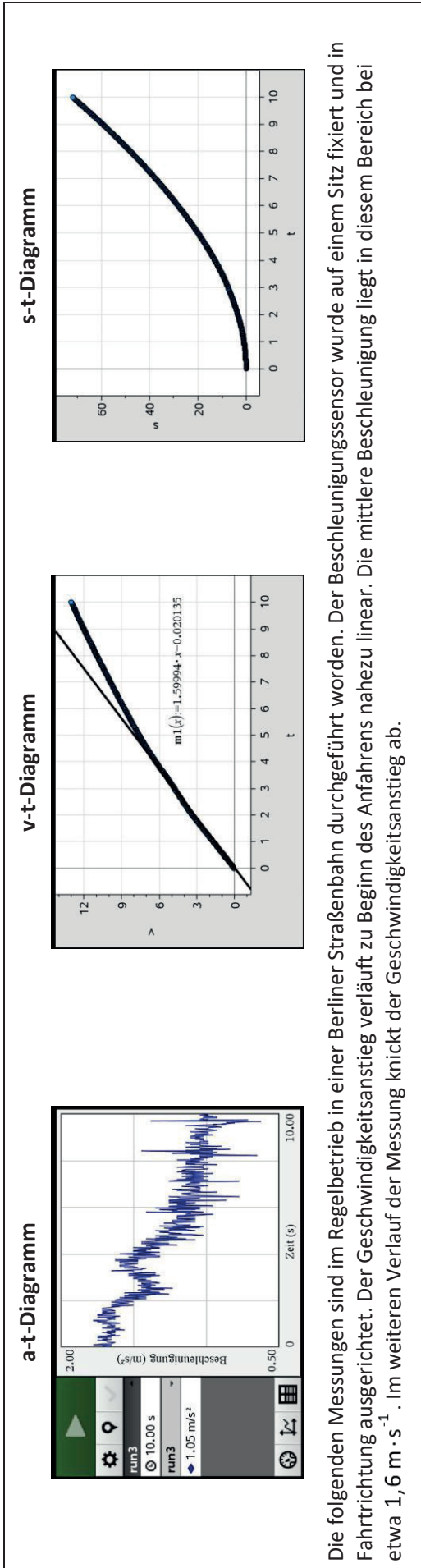
1. 2. PKW mit Automatikgetriebe



1. 3. Motorrad mit Doppelkupplungsgetriebe

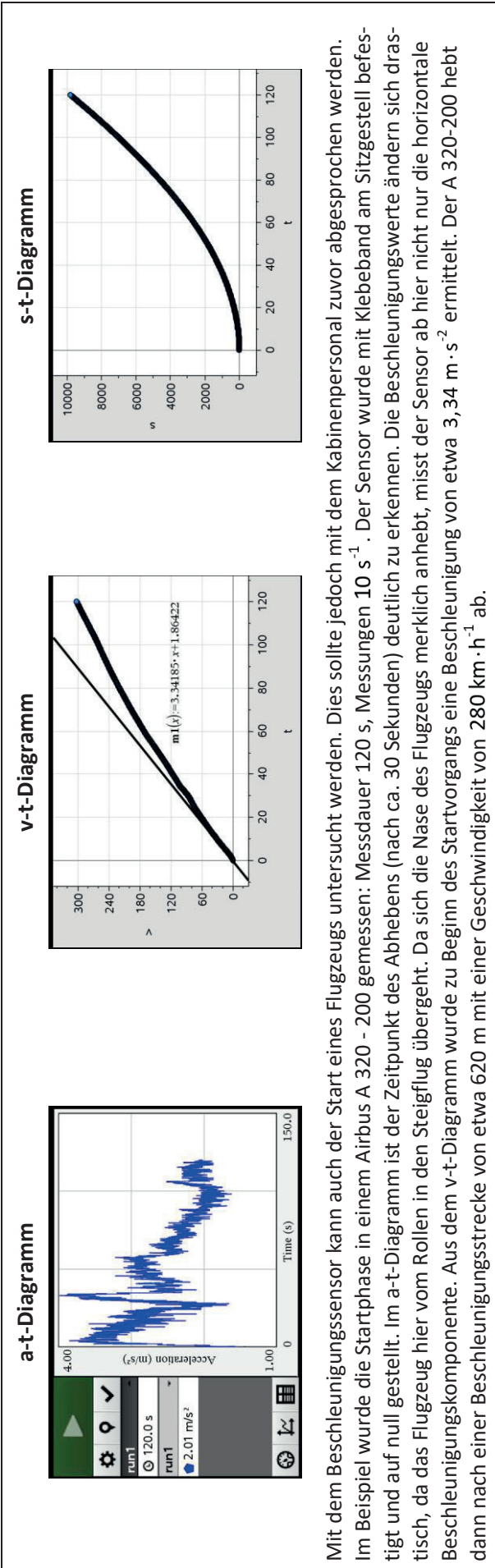


1.4. Straßenbahn



Die folgenden Messungen sind im Regelbetrieb in einer Berliner Straßenbahn durchgeführt worden. Der Beschleunigungssensor wurde auf einem Sitz fixiert und in Fahrrichtung ausgerichtet. Der Geschwindigkeitsanstieg verläuft zu Beginn des Anfahrens nahezu linear. Die mittlere Beschleunigung liegt in diesem Bereich bei etwa $1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Im weiteren Verlauf der Messung knickt der Geschwindigkeitsanstieg ab.

1.5. Flugzeug



Mit dem Beschleunigungssensor kann auch der Start eines Flugzeugs untersucht werden. Dies sollte jedoch mit dem Kabinenpersonal zuvor abgesprochen werden. Im Beispiel wurde die Startphase in einem Airbus A 320 - 200 gemessen: Messdauer 120 s, Messungen 10 s^{-1} . Der Sensor wurde mit Klebeband am Sitzgestell befestigt und auf null gestellt. Im a-t-Diagramm ist der Zeitpunkt des Abhebens (nach ca. 30 Sekunden) deutlich zu erkennen. Die Beschleunigungswerte ändern sich drastisch, da das Flugzeug hier vom Rollen in den Steigflug übergeht. Da sich die Nase des Flugzeugs merklich anhebt, misst der Sensor ab hier nicht nur die horizontale Beschleunigungskomponente. Aus dem v-t-Diagramm wurde zu Beginn des Startvorgangs eine Beschleunigung von etwa $3,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ermittelt. Der A 320-200 hebt dann nach einer Beschleunigungsstrecke von etwa 620 m mit einer Geschwindigkeit von $280 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ab.

2. Bremsen

Einleitung / Motivation

Exemplarisch werden hier nur die Bremsvorgänge an Autos dargestellt. Untersuchungen von Bremsvorgängen an anderen Fahrzeugen wären weitere interessante Experimente.

Ähnlich den Beschleunigungsvorgängen soll hier untersucht werden, inwieweit die realen Vorgänge von der Theorie abweichen. Die Thematik eignet sich ebenfalls gut, um das erworbene theoretische Wissen anzuwenden, die Abweichungen zu den theoretischen Modellen zu erkennen und diese mindestens ansatzweise zu erklären. Aus dem realen Bremsvorgang eines Kraftfahrzeugs lassen sich zusätzlich interessante physikalische Fragen ableiten. Der Aufwand dazu ist auch hier gering, da nur ein Beschleunigungssensor notwendig ist.

a) Durchführung des Experiments

Materialliste	Beschleunigungssensor
	Messwerterfassungssystem

Die Messung sollte zeitbasiert mit einer Länge von etwa 3 Sekunden Messdauer und etwa 50 Messungen pro Sekunde erfolgen.

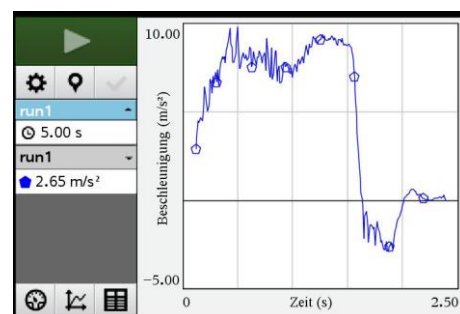
Der Bremsvorgang eines Fahrzeugs bis zum Stillstand kann einfach auf einer nicht zu stark befahrenen Straße mithilfe des Einachsen-Beschleunigungssensors über eine bestimmte Zeit aufgenommen werden, indem der Sensor an einer geeigneten Stelle, z.B. durch Befestigung mit einem zweiseitigen Klebeband an einer der Seitenscheiben, montiert wird (siehe Abb.). Die Messzeit richtet sich nach dem verwendeten Fahrzeugtyp und den äußeren Gegebenheiten.

Es sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass die Straße zum Zeitpunkt der Durchführung der Messung nicht von anderen Fahrzeugen befahren wird, da Fahrzeugführer dieser Fahrzeuge durch die abrupte Abbremsung irritiert werden könnten.

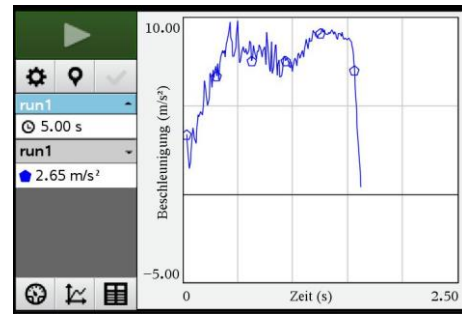


b) Auswertung der Messdaten

Aus den gemessenen Beschleunigungsdaten lassen sich das Geschwindigkeits-Zeit- und das Weg-Zeit-Diagramm leicht ableiten. In diesem Fall haben wir entschieden, den Betrag der Bremsbeschleunigung (bzw. Verzögerung) zu betrachten, damit in der Auswertung der Bremsweg kein negatives Vorzeichen besitzt. Daher zeigt das folgende Diagramm positive Werte für die Bremsbeschleunigung. Zeitlich ist hier noch mehr als der eigentliche Bremsvorgang dargestellt. Für die Berechnungen im Weiteren muss noch das geeignete Zeitintervall ausgewählt werden:



Das Messwert-Diagramm (a-t-Diagramm) zeigt den Verlauf des Bremsvorgangs. Hier ist deutlich die Auswirkung des ABS (Anti-Blockier-System) zu erkennen. Vor allem bei noch höherer Geschwindigkeit sind dadurch grössere Schwankungen der Messwerte zu erkennen. Die negativen Beschleunigungswerte entstehen dadurch, dass das Fahrzeug zunächst „mit der Nase eintaucht“. Dies kommt dadurch zu Stande, dass die Bremswirkung auf der Vorderachse deutlich stärker gewählt wird, um die Fahrstabilität möglichst zu gewährleisten.

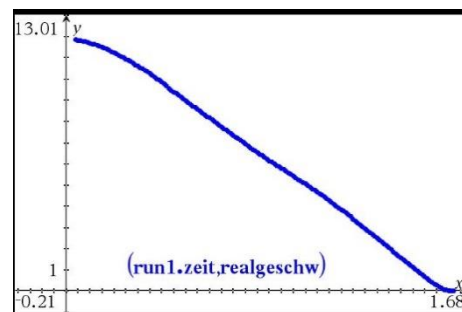


Dadurch nehmen das Federungssystem und die Stoßdämpfer einen Teil der kinetischen Energie des Fahrzeugs auf und geben diese nach dem Erreichen des Stillstands an das Fahrzeug mitsamt seinen Insassen zurück. Somit wirkt nach Erreichen des Stillstands eine der eigentlichen Fahrtrichtung entgegengesetzte Beschleunigung und entsprechend der Newtonschen Axiome auch eine (nicht unwesentliche) Kraft auf die Insassen. Diese werden dadurch nach hinten geschleudert, was bei falsch eingestellten Kopfstützen durchaus zu Verletzungen an der Halswirbelsäule (HWS-Syndrom) und des Kopfes führen kann.

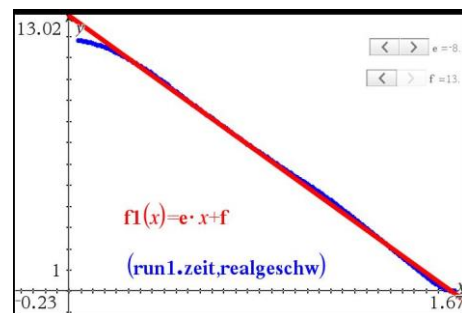
Es können allerdings nicht alle Messwerte für die weiteren Betrachtungen herangezogen werden, da das Fahrzeug nach dem Stillstand nachwippt und diese Werte bei der folgenden Integration zu starken Abweichungen führen würden. Daher sollte zunächst der Bereich der Messwerte auf den eigentlichen Bremsvorgang beschränkt werden, wie in der folgenden Abbildung angedeutet wird.

v-t-Diagramm

Ermittelt man die Werte für die Geschwindigkeit durch Integration der a-t-Werte, ergibt sich folgendes Diagramm. Dabei muss beachtet werden, dass man zunächst die Anfangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs ermittelt und diese bei den Berechnungen einfließen lässt, denn der Sensor misst hier ja Beschleunigungswerte. Somit kommt man zu einem mit Lernen besser auswertbaren Diagramm, das eine fast lineare Abnahme der Geschwindigkeit bis zum Stillstand zeigt.

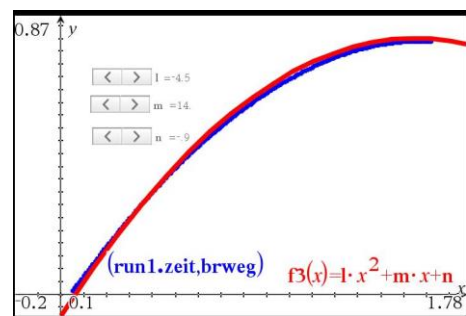


Der Geschwindigkeitsverlauf lässt sich durch Angleichen mit einer linearen Funktion (Schieberegler) gut annähern. Somit lassen sich die mittlere Beschleunigung (ca. $8,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) und die Anfangsgeschwindigkeit (ca. $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. $46,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) bestimmen.



s-t-Diagramm

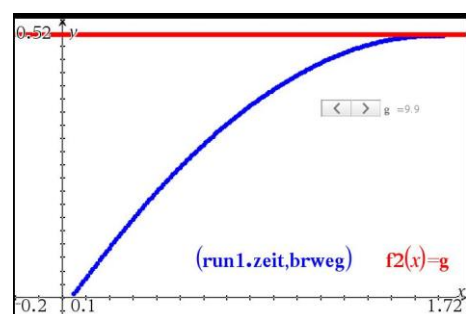
Das Diagramm zeigt den für den Bremsvorgang den zu erwartenden Verlauf. Auch hier lassen sich durch Angleichen mit einer quadratischen Funktion (Schieberegler) der theoretische Verlauf gut wiedergeben und die Beschleunigung sowie der Bremsweg annähernd bestimmen.



Durch die Annäherung lässt sich die Verzögerung und der Bremsweg bestimmen:

$$\text{Verzögerung } a = 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\text{Bremsweg } s = 9,9 \text{ m}$$



c) Diskussion und Interpretation

a-t-Diagramm

Warum ergeben sich im a-t-Diagramm negative Werte? – Das Federungssystem speichert bei Bremsen einen Teil der Energie. Das kann dazu führen, dass die Insassen in den Sitzen erst nach vorne und dann nach hinten geschleudert werden. Die Verzögerung ist nicht konstant, weil der Druck im Bremssystem erst aufgebaut werden muss. Ausserdem regelt das ABS das Bremssystem in Intervallen.

v-t-Diagramm

Der zu erwartende theoretische Verlauf wird recht gut wiedergegeben. Durch Annäherung mit einer linearen Funktion lassen sich die mittlere Bremsbeschleunigung und die Anfangsgeschwindigkeit ableiten. In diesem Beispiel betragen die Bremsbeschleunigung ca. $8,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (also etwas weniger als die Fallbeschleunigung) und die Anfangsgeschwindigkeit ca. $13,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($46,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Somit korreliert der Wert für die Anfangsgeschwindigkeit recht gut mit dem realen Wert (wir hatten das Fahrzeug nach Tacho auf ca. $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ beschleunigt). Legt man diese Werte zu Grunde, so müsste der Bremsweg rechnerisch $10,6 \text{ m}$ bzw. $10,5 \text{ m}$ betragen.

s-t-Diagramm:

Auch hier gibt die Graphik den theoretischen Verlauf recht gut wieder. Die Annäherung der Kurve an eine Parabel führt hier allerdings auf einen Betrag der Beschleunigung von etwa $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, was vor allem auf die Abweichungen durch die zweifache numerische Integration zurückzuführen ist. Der Bremsweg beträgt dadurch, graphisch bestimmt, nur etwa $9,9 \text{ m}$. Würde man die hier ermittelten $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ einer Rechnung zu Grunde legen, müsste der Bremsweg $11,8 \text{ m}$ betragen.

3. Zentripetalbeschleunigung beim Fahren im Kreis

a) Einleitung / Motivation

Die Messung der Zentripetalbeschleunigung erfolgt im Unterricht üblicherweise mit Hilfe eines Zentralkraftgerätes. Die Verwendung eines Taschencomputers zur Messwerterfassung erlaubt es, die Beschleunigung realitätsnaher vorzunehmen.

Dabei fährt man mit einem Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit im Kreis.

Gleichzeitig wird die Radialbeschleunigung mit Hilfe eines Beschleunigungssensors gemessen.

Materialliste	Beschleunigungssensor
	Messwerterfassungssystem

b) Vorbereitung und Durchführung des Experiments

Der Sensor wird z.B. an der Fensterscheibe oder dem Armaturenbrett radial zur Kreisbahn angebracht. Ein 1-Achs-Beschleunigungssensor ist ausreichend, jedoch ergibt sich bei der Nutzung eines 3-Achs-Beschleunigungssensors bei einer senkrechten Autoscheibe automatisch, dass eine der Achsen die richtige Orientierung besitzt.



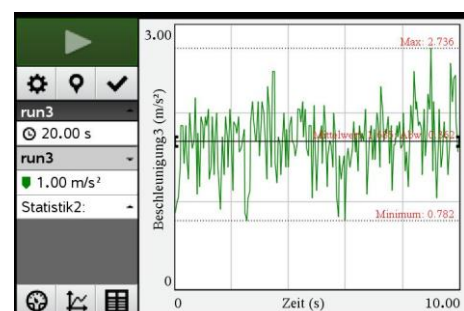
Die Kreisfahrt kann auf einem abgesperrten Areal erfolgen. Hier ergibt sich das Problem des genauen Spurhaltens auch bei vorher aufgezeichnetem Kreis. Dies kann man bei Nutzung eines Kreisverkehrs umgehen. Dieser sollte einen ausreichenden Durchmesser bei geringer Verkehrsdichte aufweisen. Das Experiment sollte unbedingt von zwei Personen durchgeführt werden, da die Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr deutlich mehr Aufmerksamkeit erfordert.

Ein Fahrzeug mit Tempomat und digitaler Geschwindigkeitsanzeige ist von Vorteil.

Das Messintervall sollte mindestens 10 bis 20 Sekunden betragen, um ausreichend genaue Mittelwertbildung zu ermöglichen.

c) Auswertung der Messdaten

Die Beschleunigung wird über einen längeren Zeitraum gemessen und der Mittelwert bestimmt. Die Abbildung zeigt die Daten exemplarisch bei einer Geschwindigkeit von $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.



Die so bestimmten Werte für die mittlere Beschleunigung werden dann in eine Wertetabelle übernommen und das Geschwindigkeitsquadrat berechnet. Der Zusammenhang zwischen der Zentripetalbeschleunigung und der Bahngeschwindigkeit folgt dem Gesetz:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

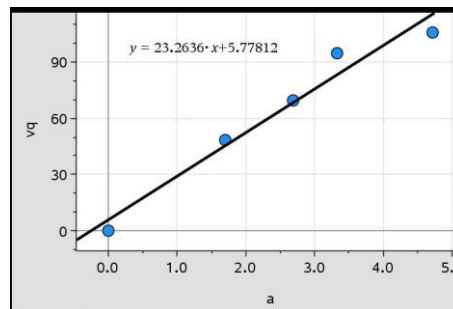
A	v	B	a	C	vq	D	E
=				=a[*]a[[]			
1	0		0		0		
2	6.94444		1.69		48.2253		
3	8.33333		2.69		69.4444		
4	9.72222		3.33		94.5216		
5	10.2778		4.71		105.633		
6							
7							
A1	0						

Danach werden die Werte in ein v^2 - a -Diagramm übernommen und eine lineare Regression durchgeführt. Somit entspricht die Steigung der Geraden dem Radius des Kreises.

Als Gleichung der Regressionsfunktion ergibt sich:

$$y = 23,3 x + 5,8$$

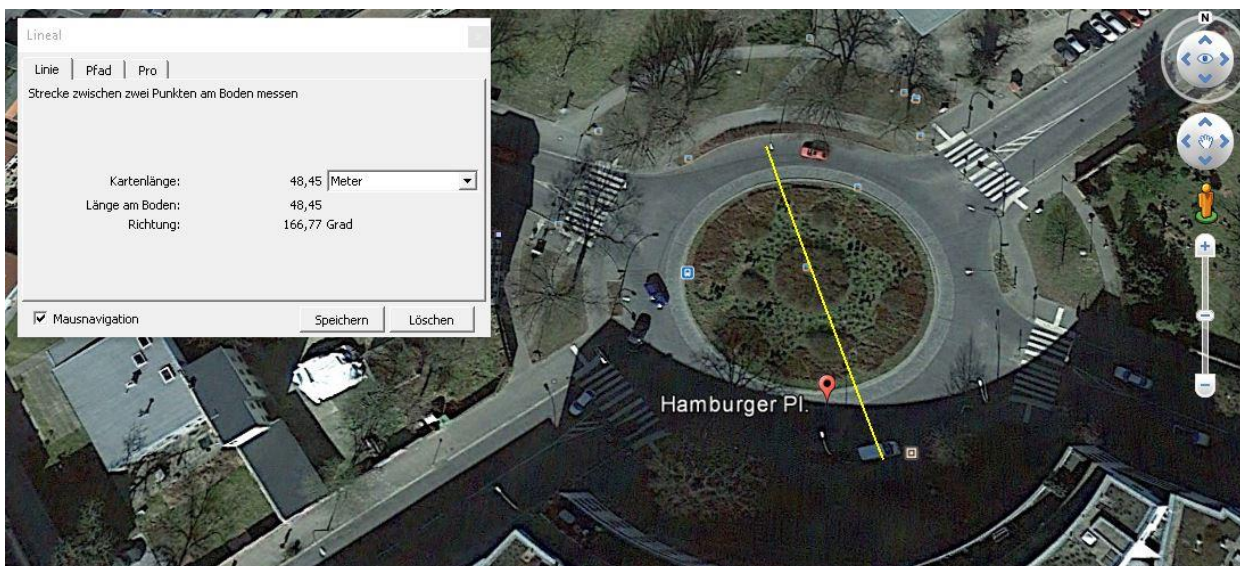
Somit ist der Radius $r = 23,3$ m.



d) Diskussion und Interpretation

In diesem Fall ergibt sich als Durchmesser des Kreises ein Wert von 46,6 m. Nachmessen in einem Satellitenbild ergibt für den verwendeten Kreisverkehr einen Durchmesser von ca. 48,5 m.

Die Abweichungen können z.B. durch die Positionierung des Sensors im Fahrzeug und die Auflösung des Satellitenbildes erklärt werden.



4. Motor

4. 1. Anlasserstrom – Indirekte Messung großer Ströme

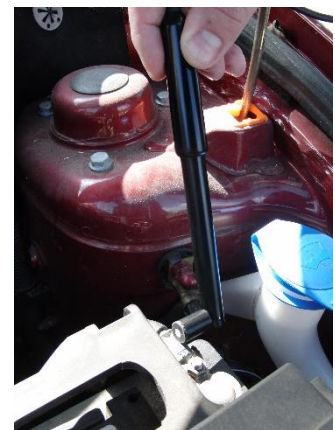
a) Einleitung

Der Umgang mit großen Strömen ist in der Schule eher unüblich, da zum einen geeignete Messgeräte fehlen und zum anderen solche Ströme selten auftreten. Beim Umgang mit Hochstrom müssen zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen beachtet werden. Trotzdem kommen Ströme jenseits von 100 A im täglichen Leben vor. Hauptproblem beim Messen dieser Ströme ist der Einbau eines geeigneten Messgerätes in den Stromkreis und die sorgfältige Kontaktierung der Anschlüsse.

Hier hilft eine berührungslose und somit gefahrlose Methode weiter, bei der das Magnetfeld eines (geraden) stromdurchflossenen Leiters gemessen wird. Die zugehörigen Grundlagen werden in der Oberstufe vermittelt.

Im Alltag treten größere Ströme zum Beispiel bei Solaranlagen, beim Schweißen oder beim Anlassen eines Autos auf. Gerade das Auto lässt sich sicherlich relativ einfach für eine Untersuchung bereitstellen. Ein PKW ist mit einem Elektromotor (Anlasser) ausgestattet, der beim Starten die Kurbelwelle des Verbrennungsmotors in Rotation versetzt, bis dieser anspringt.

Ein Eingriff in die geöffnete Motorhaube stellt natürlich ein erhebliches Risiko dar, da sowohl Verbrennungen, als auch Verletzungen an heißen, scharfen oder beweglichen Teilen drohen. Zusätzlich sollte darauf geachtet werden, die Feststellbremse anzuziehen und den Leerlauf einzulegen, so dass sich das Fahrzeug während des Versuches nicht bewegen kann.



Materialliste	Hallsonde Messwerterfassungssystem
---------------	---------------------------------------

b) Durchführung des Experiments

Im folgenden Versuch wurde eine Hallsonde direkt neben das Massekabel eines PKW gehalten und die magnetische Flussdichte B in Abhängigkeit von der Zeit t gemessen, während der PKW angelassen wurde. Dabei muss auf die Kompensation des Erdmagnetfeldes geachtet werden, z.B. durch ein Kalibrieren (Nullstellen) des Sensors. Das Massekabel ist in der Regel schwarz, fingerdick und verbindet den Minuspol der Batterie mit der Karosserie. Technisch liegt daher keine Spannung gegenüber metallischen Teilen des PKW an, was die Berührung ungefährlich macht. Außerdem ist es oftmals leichter zu erreichen als der Pluspol der Batterie.



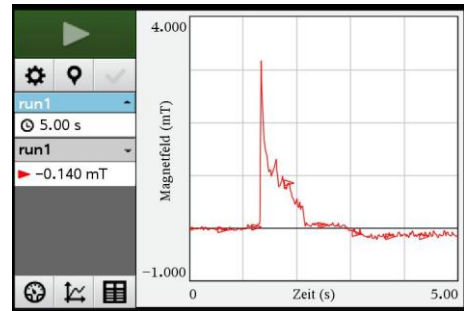
Über dieses Kabel fließen alle Ströme, an denen die Batterie beteiligt ist. Also insbesondere der Strom für den Anlasser beim Starten des PKW.

c) Versuchsergebnis / Auswertung

In der Abbildung rechts ist der zeitliche Verlauf der Flussdichte dargestellt. Der erste Peak liegt bei 3,18 mT. Der Abstand zwischen dem Mittelpunkt der Sonde und dem Mittelpunkt des Massekabels beträgt 2,2 cm.

Für die magnetische Flussdichte eines geraden stromdurchflossenen Leiters gilt:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$



Setzt man die obigen Werte in die Formel ein und löst sie nach I auf, dann erhält man eine maximale Stromstärke von 350 A. Diese wird nur sehr kurzzeitig beim ersten Einsetzen des Anlassers fließen. Dabei muss die Kraft zur Überwindung der Verdichtung in den Zylindern des Verbrennungsmotors aufgebracht werden. Aus Datenblättern für typische PKW-Anlasser entnimmt man Leistungen von ca. 2 kW. Wenn man bedenkt, dass die Bordspannung beim Anlassen einbricht und die Spannung keine 12 V mehr erreicht, ist die gemessene Stromstärke im Rahmen dessen, was zu erwarten ist.

d) Diskussion und Interpretation

Der Motor des PKWs wurde gestartet und lief bis zum Ende der Messung. Man erkennt gut im obigen Diagramm, dass ca. 0,8 Sekunden nach dem Starten die Stromstärke fast ganz zurückgeht, was durch das Loslassen des Zündschlüssels, und damit das Abschalten des Anlassers bedingt ist. Während weiteren ca. 0,8 Sekunden übernimmt die Lichtmaschine die Spannungsversorgung und beginnt anschließend die Batterie zu laden, was man durch ein umgekehrtes Magnetfeld im Diagramm (negativer Stromfluss) erkennen kann.

Bei genauerem Hinsehen kann man kurz (ca. 0,2 Sekunden) vor dem Starten eine minimale Zunahme der magnetischen Flussdichte beobachten, was durch das Drehen des Zündschlüssels und dem damit verbundenen Einschalten von Bordelektronik, ggf. Radio, Licht und Lüftung hervorgerufen wird.

e) Weitere Messideen

- Gleichzeitige Strom- und Spannungsmessung zur Bestimmung der elektrischen Leistung.
- Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des Anlassvorganges (ggf. nach langer Fahrt oder bei kaltem Motor).
- Untersuchung des Einflusses des Kupplungszustandes (entlastetes oder durchgetretenes Kupplungspedal im Leerlauf) auf den Anlassvorgang.

4. 2. Autoabgase – Messung des CO₂

a) Einleitung / Motivation

Autoabgase stellen heutzutage ein wichtiges Kaufkriterium dar, da es inzwischen ein gesteigertes Umweltbewusstsein in der Bevölkerung gibt und auch die Besteuerung von Kraftfahrzeugen zunehmend nach dem CO₂-Ausstoß festgelegt wird. So darf nach EU-Verordnung ab 2020 die Flotte eines Herstellers pro Fahrzeug im Schnitt nur noch 95 g CO₂ auf 100 km ausstossen. Damit wird diese Thematik auch für den Unterricht interessant. Die uns zur Verfügung stehenden CO₂- und O₂-Sensoren ermöglichen uns, entsprechende Messungen durchzuführen.

Materialliste	CO ₂ - und/oder O ₂ -Sensor
	Temperatursensor
	Messwerterfassungssystem
	Stativmaterial
	ggf. PET-Flasche o. ä.

b) Durchführung des Experiments

Der jeweilige Sensor kann einfach mithilfe von Stativmaterial am Auspuff des Fahrzeugs platziert werden. Um ein gutes Umströmen des Sensors zu erreichen, kann man z. B. eine aufgeschnittene PET-Getränkeflasche nutzen (s. Abb.).

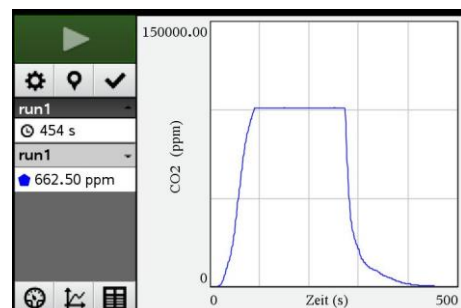
Die Messungen erfolgen zeitbasiert mit den jeweiligen Grundeinstellungen (1 Messung pro s mit 300 s (O₂) bzw. 600 s (CO₂) Messdauer). Viel länger sollte die Messdauer nicht gewählt werden, um thermische Beschädigungen der Sensoren auszuschließen.



c) Auswertung der Messdaten

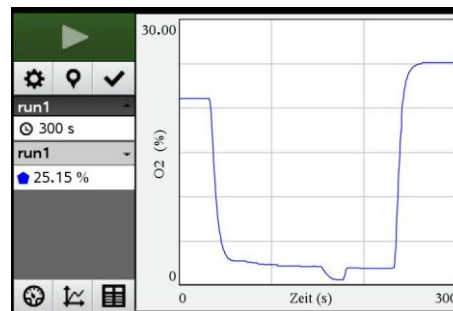
CO₂-Sensor

Dieser Sensor besitzt eine Sättigungsgrenze von 100.000 ppm. Diese wird allerdings recht schnell erreicht, so dass nach ca. 1,5 Minuten kein weiterer Anstieg zu verzeichnen ist. Nach Abschalten des Motors sinkt der CO₂-Wert erwartungsgemäß wieder auf seinen Ausgangswert ab. Aufgrund der schnellen Sättigung des Sensors können hier allerdings keine wesentlichen Aussagen über mögliche Zusammenhänge zwischen CO₂-Gehalt der Auspuffgase und anderen Größen abgeleitet werden. Zudem reagiert der Sensor sehr träge, da er von den Gasen seitlich umströmt wird.



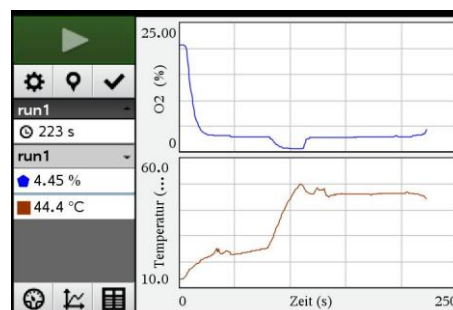
O₂-Sensor

Hier treffen die Abgase den Sensor direkt von vorn, was das Ansprechverhalten des Sensors deutlich verbessert. Der Sauerstoffgehalt sinkt erwartungsgemäß nach dem Starten des Motors und zwar innerhalb von 20 Sekunden von etwa 22% auf 2,2% und stabilisiert sich dann im Leerlauf. Bei zusätzlichem Gas geben erhöht sich die Drehzahl des Motors und der Sauerstoffgehalt sinkt schnell auf etwa 0,6% ab. Nach dem Abschalten des Motors steigt der Sauerstoffgehalt rasch wieder, sogar über seinen ursprünglichen Wert hinaus. Dieses Verhalten ist nicht einsichtig erklärbar. Wir vermuten, dass eventuell das sich in der PET-Flasche ansammelnde Kondenswasser den Sensor beeinflusst.



O₂- und Temperatursensor

Um zu überprüfen, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffgehalt und der Temperatur der Abgase gibt, sind im dritten Teilversuch beide Sensoren parallel verwendet worden. Im Diagramm sind oben der Sauerstoffgehalt und unten der Temperaturverlauf dargestellt.



d) Diskussion und Interpretation

Die Messungen zeigen, dass der Sauerstoffgehalt im Autoabgas nicht von dessen Temperatur abhängt, wohl aber von der Drehzahl des Motors. Nach kurzer Zeit im Leerlauf erreicht der Sauerstoffgehalt einen konstanten Wert, hier ca. 3%. Ebenso stellt sich zunächst eine Gleichgewichtstemperatur von ca. 24°C ein. Beim zwischenzeitlichen Gas geben erhöht sich die Abgastemperatur und der Sauerstoffgehalt sinkt. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei erhöhter Drehzahl die Verbrennung des Treibstoffs bei einer höheren Temperatur und mit einem höheren Wirkungsgrad erfolgt. Geht man wieder auf die Leerlaufdrehzahl zurück, so steigt auch der Sauerstoffgehalt wieder auf den vorherigen Wert. Die Abgastemperatur bleibt jedoch bei ca. 46°C. Dies ist wahrscheinlich die Folge des mittlerweile aufgewärmten Abgassystems.

Um die Zusammenhänge zwischen Motordrehzahl, Sauerstoff- und CO₂-Gehalt genauer untersuchen zu können, müsste man die Abgase genau beim Verlassen aus den Zylindern ausmessen, da die dann folgenden technischen Einrichtungen wie Abgasrückführung oder Abgasreinigung die wahren Zusammenhänge am Auspuff verfälschen. Ein dortiger Zugriff ist aber mit einfachen Mitteln nicht möglich.

4.3. Drehzahlmessungen mittels Mikrofonsensor

a) Einleitung / Motivation

Die Drehzahl eines Motors wird in vielen Autos im Armaturenbrett angezeigt. Allerdings ist die Anzeige recht ungenau. Falls kein Drehzahlmesser vorhanden sein sollte, lässt sich die Drehzahl auch indirekt über den Schallpegel am Auspuff des Motors exakt messen. So kann abschließend zum Beispiel auch das Standgas exakter eingestellt werden.

Materialliste	Mikrofonsensor
	Messwerterfassungssystem mit hoher Auflösung

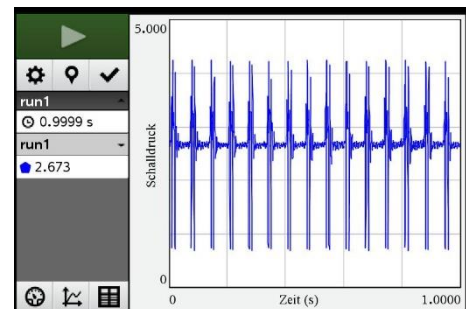
b) Durchführung des Experiments

Für die Messung positioniert man den Mikrofonsensor an den Auspuff eines Motorrades und startet den Motor im Leerlauf. Obige Messparameter erweisen sich als sinnvoll. Da unser Motorrad nur ein Zylinder hat, lassen sich bei dieser Messung die einzelnen Zündungen besser beobachten als bei einem Auto und die Grundlagen besser nachvollziehen. Deshalb ist die Messung am Motorrad der am Auto vorzuziehen.



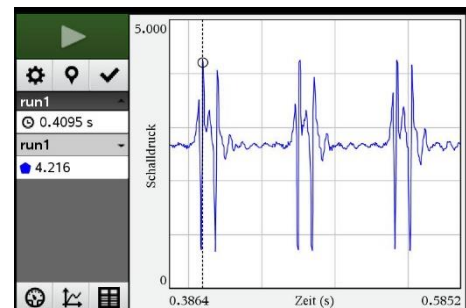
Der Schalldruck wird gegen die Zeit aufgezeichnet.

Dabei werden 2500 Messungen pro Sekunde ausgeführt.

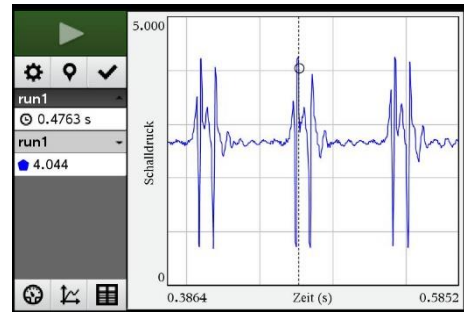


c) Auswertung und Interpretation der Messdaten

In der Zoomansicht erkennt man deutlich je zwei Schalldruckimpulse, die sich nach einer längeren Pause wiederholen. Dabei ist der erste Impuls die direkte Folge der Zündung und der zweite Druckimpuls entsteht durch die Reflektion des Druckes im Auspuff (Resonanzschalldämpfer).



Pro Zündvorgang finden insgesamt zwei Umdrehungen der Kurbelwelle statt. Deshalb ist die Zündfrequenz mit Zwei zu multiplizieren. Da die Drehzahl bei einem Kraftfahrzeug in Umdrehungen pro Minute angegeben wird, muss man diese abschließend mit 60 multiplizieren.



Für das im Experiment verwendete Motorrad erhält man eine Zeitdifferenz von 66,6 ms, was einer Drehzahl von ca. 1800 Umdrehungen pro Minute entspricht. Ein Vergleich mit dem Drehzahlmesser am Motorrad bestätigt die gemessenen Werte.

d) Weitere Messideen

Neben einem Motorrad könnte man auch ein PKW oder ein Moped mit einem Ein-, Zwei- oder Vier-Zylindermotor untersuchen und die entsprechende Drehzahl im Leerlauf bestimmen lassen. Hierbei ist gegebenenfalls zu berücksichtigen, dass es sich um einen Zwei- oder Viertaktmotor handelt und die Auswertung entsprechend angepasst werden muss. Gerade beim PKW ergibt sich ein komplexeres Druckverlaufsbild, da sich von den vier Zylindern und dem komplexeren Abgasreinigungssystem mehrere Signale überlagern. Optisch ähnelt der Druckverlauf dann fast einer Sinusfunktion.

e) Zusätzliche Informationen

Das Experiment kann zum Beispiel als Abschluss des Themenblocks Wärmekraftmaschinen durchgeführt werden. Die Kenntnis der Funktionsweise eines Zweitakt- bzw. Viertaktmotors ist für die Auswertung der Messdaten bei den Lernenden erforderlich. Schöne 3D-Simulationen, die die Funktionsweise eines Viertakt-Otto-Motors anschaulich vermitteln, findet man im Internet oder Videoportalen.

5. Messung des Luftwiderstandes mit Hilfe eines PKWs

a) Einleitung / Motivation:

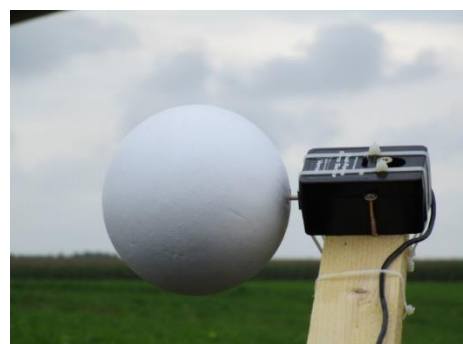
Der Luftwiderstand spielt beim Autofahren eine große Rolle. Er ist jedoch, direkt am Fahrzeug, nicht einfach zu messen. Ein Windkanal mit ausreichend großen Abmessungen und Windgeschwindigkeiten steht in der Regel nicht zur Verfügung. Da die zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten für das Auto genauso gelten wie für idealisierte Körper, werden diese in diesem Experiment an einer Kugel genauer untersucht. Das Auto dient hierbei zur Erzeugung eines Luftstroms mit konstanter Geschwindigkeit (Tempomat).

Materialliste	Holzstäbchen (z. B. Schaschlikstäbchen)
	Styroporkugeln mit verschiedenen Durchmessern (z. B. 5 cm bis 12 cm)
	Kraftsensor
	Messwerterfassungssystem
	PKW mit Tempomat

b) Durchführung des Experiments

Die Luftwiderstandskraft kann direkt mit Hilfe eines Kraftsensors gemessen werden. Dieser ist mit einem Schraubhaken (Zollgewinde) ausgestattet. Da passende Schrauben üblicherweise nicht vorhanden sind, wird ein Holzstäbchen eingedreht und eine Styroporkugel aufgesteckt. Die Anordnung wird auf einer Holzlatte befestigt und aus dem fahrenden Auto herausgehalten. Dabei muss die Latte lang genug sein, damit sich die Kugel außerhalb der Luftverwirbelungen in der Nähe der Karosserie befindet. Diese Aufgabe muss unbedingt von einer zweiten Person durchgeführt werden. Dabei ist auf Hindernisse (Lampen, Straßenschilder, Passanten etc.) am Straßenrand zu achten.

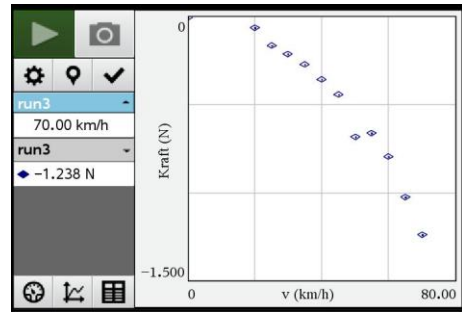
Es können die Abhängigkeiten zwischen der Geschwindigkeit bzw. der Querschnittsfläche und der Luftwiderstandskraft untersucht werden. Im ersten Fall benutzt man dieselbe Kugel bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, im zweiten Fall werden die Kugeln bei konstanter Fahrgeschwindigkeit gewechselt.



c) Auswertung der Messdaten

Luftwiderstandskraft in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

In einer Tabellenkalkulation wird die Geschwindigkeit in Grundeinheiten umgerechnet und das negative Vorzeichen der Kraft beseitigt. Die Kraftanzeige ist negativ, weil am Sensor aufgrund der Anordnung Druckkräfte angreifen.



Die so gewonnenen Daten werden in einem Kraft-Geschwindigkeits-Streudiagramm dargestellt:

Der zu erwartende quadratische Zusammenhang ist klar zu erkennen. Da der Koordinatenursprung sicherlich Teil der Parabel sein muss, wird folgende Modellfunktion gewählt:

$$f(x) = a_2 \cdot x^2$$

Die Anpassung liefert: $a_2 = 0,0029 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$

Die Luftwiderstandskraft berechnet sich nach der Formel

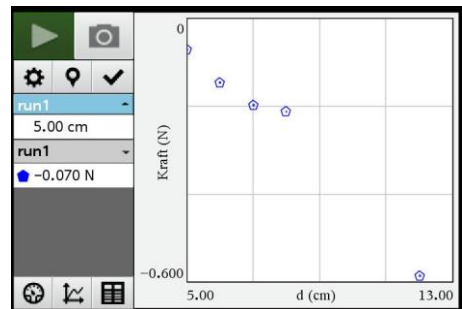
$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho_L \cdot A \cdot v^2$$

Mit der Luftdichte $\rho_L = 1,2041 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, dem Kugelradius $r = 6 \text{ cm}$ und der daraus berechneten Querschnittsfläche $A = r^2 \pi = 0,01131 \text{ m}^2$ und $a_2 = \frac{F_L}{v^2} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho_L \cdot A$ ergibt sich $c_w = \frac{2 \cdot a_2}{\rho_L \cdot A} = 0,4259$.

Der c_w -Wert einer idealen Kugel beträgt 0,45.

Luftwiderstandskraft in Abhängigkeit der Querschnittsfläche

Auch hier werden Kraft und Durchmesser der Kugel umgerechnet und die Querschnittsfläche bestimmt.

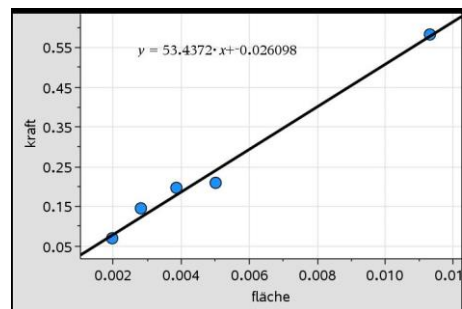


Die Daten werden in einem Kraft-Querschnittsflächen-Diagramm dargestellt:

Die Modellierung mit einer linearen Funktion der Form $f(x) = m \cdot x + t$ liefert:

$$m = 53,4372 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

Aus $\frac{F_L}{A} = m = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho_L \cdot v^2$ folgt $c_w = \frac{2 \cdot m}{\rho_L \cdot v^2}$.



Mit der Luftdichte $\rho_L = 1,2041 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ und der Geschwindigkeit $v = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 13,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ergibt sich somit ein c_w -Wert von 0,4601.

d) Diskussion und Interpretation

Es fällt auf, dass die Ausgleichsgerade im Kraft-Querschnittsflächen-Diagramm nicht durch den Koordinatenursprung verläuft. Der Achsenabschnitt ist negativ, was auf eine Gegenkraft schließen lässt. Sie entsteht vermutlich durch die Luft, die an der Kugel entlang strömt und sich dahinter am Sensorgehäuse staut. Außerdem wirkt auf die Kugel eine Auftriebskraft, die sich auf die Messergebnisse auswirkt. Die gleichen Effekte bewirken, dass eine automatische Regression im ersten Versuchsteil die Gleichung einer Parabel ergibt, deren Scheitel nicht im Ursprung liegt.

Die hier durchgeführte Anpassung einer „Ursprungsparabel“ ist somit fehlerbehaftet, was die Abweichungen der Punkte von der berechneten Kurve erklärt. Diese Abweichungen vergrößern sich mit zunehmender Geschwindigkeit, weil sich der Stau effekt verstärkt.

e) Weitere Messideen

- Verwendung verschieden geformter Körper (z. B. Hohlkörper, Tropfenform, aerodynamisch optimierte Formen).
- Es ergibt sich die Möglichkeit zur Bestimmung der Luftdichte bei bekanntem c_w -Wert des Strömungskörpers.

6. Fensterheber, Öffnen von Tür und Kofferraumdeckel

a) Einleitung

Bei modernen Fahrzeugen gibt es eine Fülle eingebauter elektronischer Assistenten. Diese steuern und regeln entweder automatisch im Betrieb des Fahrzeugs oder sie werden durch, meist elektronische Schalter, betrieben. Für Fahrzeuge mit Einrichtungen für fremdkraftbetätigte Fenster (vulgo: elektrische Fensterheber) existiert zum Schutz vor Verletzungen durch Einquetschungen in der Europäischen Union die Richtlinie 2000/4/EG. Dort heißt es: „Diese Einrichtung muss die Bewegungsrichtung des Fensters, Schiebe-/Hubdaches bzw. der Trennwand/-scheibe umkehren, bevor eine Klemmkraft von mehr als 100 N erreicht wird; diese Forderung gilt innerhalb einer Öffnungsweite von 200 mm bis 4 mm über der oberen Fenster-/Trennwand-/ Trennscheibenkante bzw. vor der Vorderkante eines Schiebedachs und an der hinteren Kante eines Hubdachs.“

Hier wird mittels Kraftplatte und einem Messwerterfassungssystem die maximale Kraft gemessen, die der elektrische Fensterheber entwickelt, bevor das Schließen der Scheibe stoppt.

Materialliste	Kraftplatte
	Buch als Unterlage
	Messwerterfassungssystem

b) Durchführung des Experiments

Zur Messung wird die Kraftplatte auf der Unterseite mit einem Buch unterlegt, damit die Fensterscheibe an der metallenen Unterseite der Kraftplatte keinen Schaden nimmt. Das Paket aus Buch und Kraftplatte wird nun an der Oberseite der Scheibe so gehalten, dass der Rahmen fast berührt wird. In dieser Stellung wird bei der Kraftplatte der Nullpunkt gesetzt. Bei der Kraftplatte ist der kleine Messbereich ausreichend. Nun wird die Messung gestartet und der Fensterheber betätigt. Die Scheibe fährt nun nach oben und klemmt die Kraftplatte ein. Der eingebaute Kraftbegrenzer wird aktiv und sorgt dafür, dass die Scheibe wieder ein Stück nach unten fährt und dort stoppt.



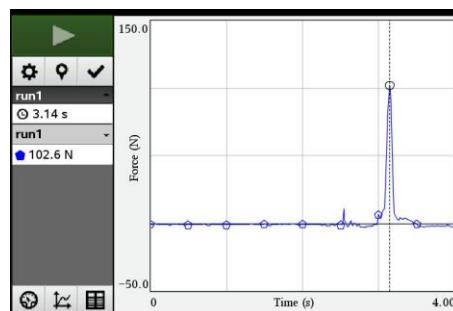
ACHTUNG: *Beim nächsten Hochfahren der Scheibe wird die Kraft nicht mehr begrenzt. Unbedingt alle Gegenstände und Körperteile aus dem Weg nehmen. Anschließend sollte man die Scheibe schließen, damit der Kraftbegrenzer bei der nächsten Betätigung des Fensterhebers wieder aktiv ist.*

c) Versuchsergebnis/Auswertung

Während der Messung, die nur wenige Sekunden dauern muss, wird das hier abgebildete Diagramm erzeugt.

Zur Auswertung muss man nur den maximalen Messwert mit Hilfe der Software auslesen und kann so den gewünschten Vergleich zu den gesetzlichen Vorgaben machen.

In dieser Messung lag der größte Wert bei 102,6 N.



d) Diskussion und Interpretation

Die EU-Verordnung schreibt einen maximalen Kraftwert von 100 N vor. Dieser wird bei dieser Messung zwar geringfügig überschritten, aber die Abweichung ist sehr gering. Diese begründet sich sicher in einer nicht ganz optimalen Messanordnung. Offensichtlich funktioniert die Kraftbegrenzung beim Fensterheber sehr gut. Auch bei den weiteren Messideen (siehe unten) findet man Kraftwerte, die sich bei diversen Messungen immer wieder einstellen. Dies legt die Vermutung nahe, dass es genau definierte Kräfte gibt, bei deren Wirken bestimmte Vorgänge initiiert werden.

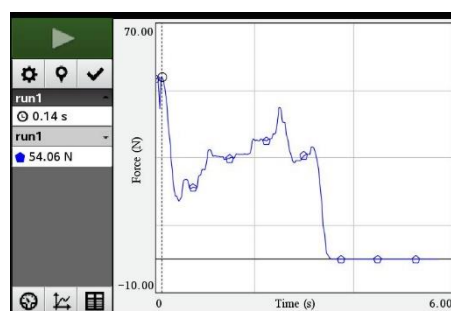
e) Weitere Messideen

- Als weitere Messobjekte eignen sich verschiedene Griffe, Taster oder Schalter im und am Auto. So kann man mit dem Zweibereichkraftsensor die Zugkraft messen, die zum Öffnen der Fahrzeugtür nötig ist. Dazu legt man einfach eine nicht elastische Schnurschlinge um den Türgriff und zieht mit dem eingehakten Kraftsensor bis sich die Tür öffnet.

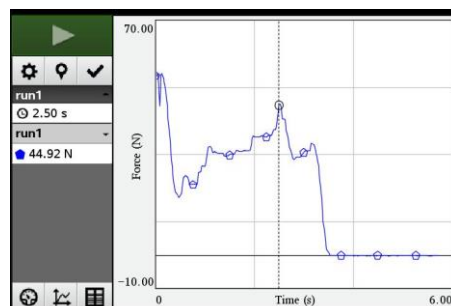


Diese Messung liefert die folgenden Diagramme:

Anhand der Markierungen erkennt man, dass das erste Maximum der Kraft bei 54 N liegt. Hier springt die Tür aus dem Schloss und der Griff federt zurück.



Im zweiten Bild kann man die Kraft ablesen, die zum Aufziehen der Tür notwendig ist. In dem Moment, in dem die Tür in Bewegung versetzt wurde, bricht die Kraft dann komplett ein und die Messung wurde beendet.

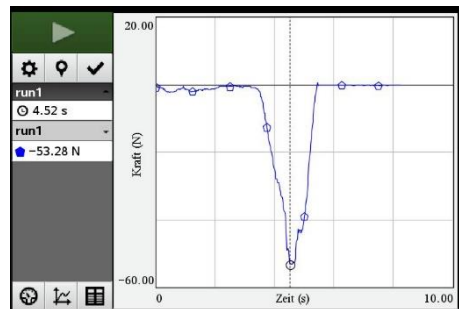


- Zusätzlich kann mit dem Zweibereichskraftsensor untersucht werden, welche Kraft zum Auslösen des elektronischen Kofferraumgriffs nötig ist. Dazu wird der Zweibereichskraftsensor auf Druck verwendet. Man setzt ihn an dem Sensorstreifen des Kofferraumgriffs an und startet die Messung. Es liegt auch hier die Vermutung nahe, dass bei einer genau definierten Kraft das Schloss reagiert und den Kofferraum öffnet.



Anhand des Diagramms der Messwerte ist erkennbar, dass die maximale Größe der Kraft, also die minimale Kraft, die den Kofferraumdeckel öffnet, hier $-53,28\text{ N}$ ist.

Da negative Vorzeichen ergibt sich, da der Kraftsensor auf Druck und nicht auf Zug verwendet wurde.



7. Unfallsimulationen – Crashtest

a) Einleitung / Motivation

Zur Entwicklung neuer Fahrzeugmodelle gehört auch die Simulation von Verkehrsunfällen. Diese Simulationen dienen einerseits der Überprüfung der Konstruktion inklusive Form und Material und andererseits der Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Deformation des Fahrzeuges, damit Insassen möglichst wenig verletzt werden.

Im Schulalltag lassen sich mit geeigneten Sensoren (Kraftmessplatte, Ultraschallpositionssensor und Beschleunigungssensor) und einer Fahrbahn solche Crashtests simulieren.

Dabei können u. a. folgende Aspekte untersucht werden

- Zusammenhänge der Geschwindigkeit mit dem Kraftstoß
- Beschleunigungsverlauf während des Aufpralls
- Auswirkungen der Aufprall-Dämpfung durch Knautschzonen aus verschiedenen Materialien (z. B. Moosgummi, Papier, Watte, Knete)
- Energieübertragungen

Materialliste	Wagen mit kleiner Rollreibung und einer Reflexionsfläche für den Ultraschallsensor
	Geeignete Fahrbahn für den Wagen
	Moosgummi, Knete, diverses Knautschzonenmaterial
	Kraftmessplatte, Ultraschallsensor, Beschleunigungssensor (möglichst $\leq 25\text{g}$) Messwerterfassungssystem

b) Durchführung des Crashtestes

Die Fahrbahn wird leicht geneigt und der Wagen somit gleichmäßig beschleunigt. Bei Verwendung der Kraftmessplatte ist eine zusätzliche Ortsmessung mit einem Abstandssensor erforderlich. Hierfür muss ggf. eine Reflexionsfläche am Wagen angebracht werden. Durch diese Montage können Effekte der Luftreibung vergrößert werden, was jedoch keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat, da nur die Aufprallgeschwindigkeit entscheidend ist.

Bei Verwendung eines Beschleunigungssensors wird dieser am Wagen befestigt. Später können aus den Beschleunigungswerten Geschwindigkeit und Fahrstrecke ermittelt werden.

Wichtig beim Aufbau ist eine besonders stabile Montage des „Targets“, also der Kraftmessplatte oder eines massiven Hindernisses, das bei Aufprall nicht verrutschen darf (verwenden von Zwingen, Stativmaterial, etc.).



Beim ersten Versuch stößt am Fahrbahnde der Wagen auf die vertikal eingerichtete Kraftplatte.

Um einen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem Kraftstoß zu zeigen, müssen gleichzeitig die Abstandsmessung und auch die Kraftmessung aufgezeichnet werden. Weil der Kraftstoß einige hundertstel Sekunden dauert, kann man ein solches Experiment nur mit den Sensoren durchführen, die solche Genauigkeit bieten. Man muss beachten, dass bei solchen Stößen nicht beliebig große Massen verwendet werden können.

Bei unserem zweiten Experiment prallt der Wagen am Ende der Fahrbahn gegen einen massiven Metallblock. Mit dem Beschleunigungssensor wird die Beschleunigung des Wagens erfasst.

Um die Auswirkung der Dämpfung aufzuzeigen kann man verschiedene Dämpfungsmittel an dem Wagen oder vor der Aufprallfläche befestigen, zum Beispiel Moosgummi, Papierkonstruktionen, Spiralfedern oder Knete.

Es empfiehlt sich zunächst einige Messungen mit einer zeitlich geringeren Auflösung durchzuführen, um sich einen Überblick des „Unfallhergangs“ zu verschaffen (Start des Wagens, Zunahme der Geschwindigkeit, Crash usw.). Um eine detaillierte Messung während des Aufpralls zu erhalten muss die zeitliche Abtastrate erhöht werden und der Start der Messung getriggert werden.

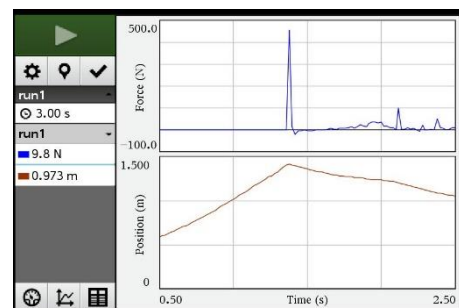
c) Auswertung der Messdaten

Bei den Auswertungen sind verschiedene Schwerpunkte möglich. Zunächst einmal bietet sich natürlich an, den Unfallhergang im Diagramm nachzuvollziehen, also was genau im Diagramm dargestellt ist und wie sich der Unfallwagen bewegt hat (Rückprall, Stillstand, etc.).

Kraftstoß und Geschwindigkeit

Das Messwert-Diagramm zeigt die gleichzeitige Erfassung der Kraft-Zeit- und Weg-Zeit-Diagramme bei dem Stoß.

Anmerkung: Da der Stoß sehr schnell stattfindet und der Zeitpunkt nicht exakt vorhergesagt werden kann, wurde die Messwerterfassung mit einer Trigger-Funktion ausgelöst.



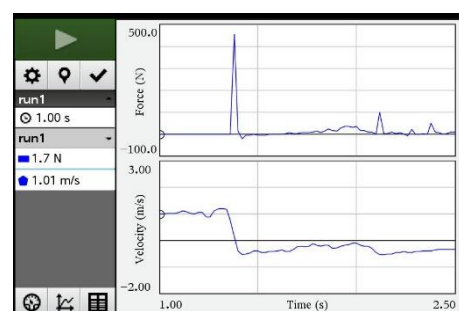
Die numerische Integration ergibt den Wert

$$\sum_{t=0}^{0.05} \Delta F \cdot \Delta t = 1,517 \text{ N} \cdot \text{s}$$

Dieser Wert entspricht mit guter Genauigkeit

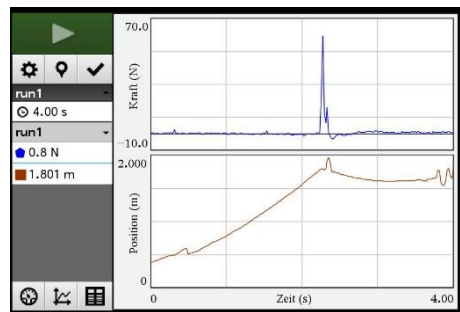
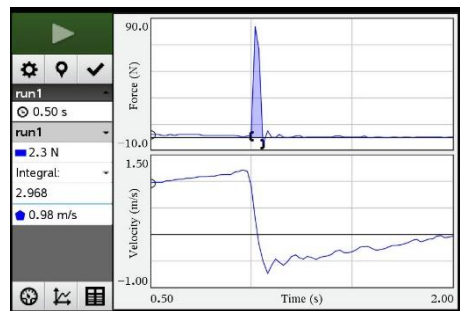
$$m \cdot v = 2,015 \text{ kg} \cdot 0,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1,55 \text{ N} \cdot \text{s}$$

wobei der Wert der Geschwindigkeit von der Tabelle entnommen wurde.



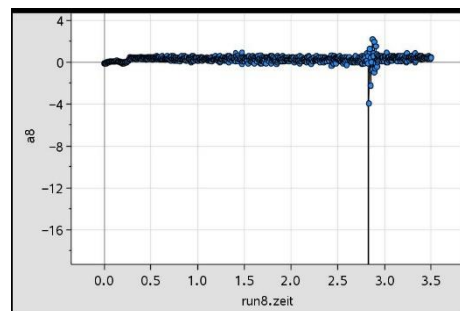
Beim ungedämpften Stoß ist beim Aufprall eine große Kraftspitze erkennbar. Danach sind durch mehrfaches Zurückprallen des Fahrzeuges weitere jedoch kleinere Kraftstöße erkennbar. Dies zeigt sowohl das F-t- als auch das s-t-Diagramm.

Beim gedämpften Stoß wurde die Stoßfläche mit dem Dämpfungsmittel (hier mit dem Moosgummi) abgedeckt. Das Diagramm zeigt ein wenig tiefere Kraftspitzen und deutlich weniger Nachstöße.

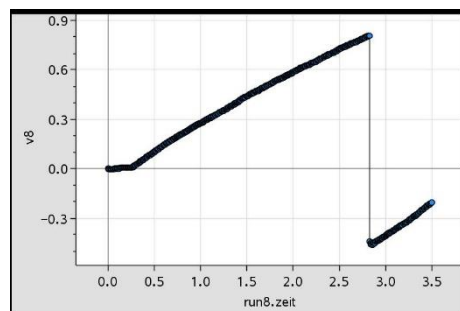


Beschleunigung beim Crash

Aus den Messwerten des Beschleunigungs-Zeit-Diagramm lässt sich erkennen, dass der Crash nach ca. 2,6 Sekunden erfolgt ist.

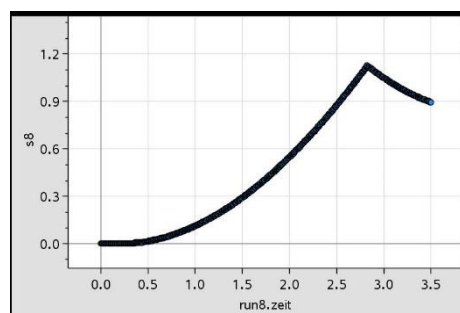


Durch einmaliges numerisches Integrieren der Beschleunigung erhält man das Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm. Aus diesem lässt sich die Aufprallgeschwindigkeit von ca. $0,81\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ablesen.

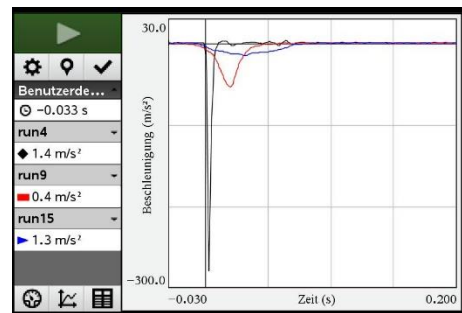


Durch numerisches Integrieren der Geschwindigkeit erhält man das Weg-Zeit-Diagramm.

Die gemessenen Beschleunigungswerte stimmen mit den theoretisch zu erwartenden Werten bei einer Bahnneigung von 2° gut überein.



Interessant sind nun Untersuchungen, bei denen versucht wird, die beim Crash auftretende Beschleunigungsspitzen zu minimieren, indem man eine Knautschzone konstruiert. Hier können Lernende ihrer Kreativität freien Lauf lassen und mit unterschiedlichsten Materialien arbeiten. Das Resultat ist nach der zugehörigen Unfallsimulation sofort zu sehen. Im nebenstehenden Diagramm wurde die zeitliche Beschleunigung ohne Knautschzone (schwarze Kurve), mit einem Wattepuffer (rote Kurve) und einer komplexeren



Knetkonstruktion (blaue Kurve) dargestellt. Man erkennt sofort, dass der Peak der schwarzen Kurve mit ca. $-280 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ erhebliche Verletzungen bei möglichen Mitfahrern hinterlassen würde – immerhin über 28 g! Beim Wattepuffer verläuft die Beschleunigung schon wesentlich langsamer steigend und flacher. Der Peak liegt hier immerhin schon nur noch bei ca. $-50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Für echte Mitfahrer unschön ist, dass bei beiden Versuchen der Wagen nach dem Crash zurückgeschleudert wird, also noch Restenergie vorhanden ist. Diese Energie im Falle eines Unfalls zu „vernichten“ ist eine der Hauptaufgaben der Autobauingenieure. Es gelingt durch unelastische Konstruktionen, die sich beim Aufprall verformen und so die kinetische Energie in Verformungsenergie umwandeln.

Im letzten Versuch wurde ein Knetmassebogen mit Sollknickstellen auf zwei Filzstiften gelagert. Das Beschleunigungsdiagramm ist dadurch nochmals abgeflachter und der Peak beträgt nur noch $-14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Den Bremsvorgang konnte man auch gut beobachten.



d) Diskussion und Interpretation

Natürlich sind diese Versuche weit entfernt von echten Crashtests, bei denen die Wirkungen auf Fahrzeug und Insassen im Detail untersucht werden, aber sie sind geeignet eine Sensibilisierung für die Phänomene und Effekte bei Unfällen zu erreichen. Interessant ist das Phänomen des Kraftstoßes, indem die Dauer des Kraftstoßes der Unfalldauer entspricht. Beim Crashtest ist es wichtig auf die maximalen Beschleunigungen zu achten. Der menschliche Körper hält je nach Richtung und Sicherung kurzfristig bis maximal $50 \cdot g$, also ca. $500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ aus ohne direkte Verletzungen [1], vereinzelt gab es auch Fälle von Unfällen bei den „Indy Car Races“, bei denen mehr als $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ohne Verletzungsfolgen blieben. Bei Rennen (u. a. Formel 1) sind die Ohrhörer der Fahrer mit entsprechenden Sensoren ausgestattet.

Hohe Motivation bieten dabei die unendlich vielen Möglichkeiten Knautschzonen zu konstruieren.

Das Thema Kraftstoß wird in vielen Schulen nicht im Grundlagenkurs vermittelt, da oft die Grundlagen der Differential- und Integralrechnung fehlen. Die Unfallsimulation bietet hier einen guten Einblick in das Thema, da die Größen numerisch vorliegen und sehr anschaulich interpretiert werden können.

Es lässt sich auch der Impuls beim Unfall betrachten, der sowohl elastisch (Spiralfeder, ungebremster Crash, etc.) als auch unelastisch (Knete) vorliegt. Bei den Experimenten mit Knet-Knautschzonen wird der Impuls vollständig absorbiert.

Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde darauf verzichtet den Unfallort stets am exakt gleichen Ort stattfinden zu lassen. Durch die unterschiedliche Länge der Knautschzonen findet der Crash natürlich auch früher oder später statt.

e) Weitere Messideen

- Weiter lassen sich systematische Untersuchungen anschließen, bei denen die Masse und/oder die Geschwindigkeit variiert wird.
- Untersuchungen zur Beschleunigung bei Stoßvorgängen finden ebenfalls noch Anwendungen bei Verpackungskonstruktionen und Ladungssicherung.

f) Zusätzliche Informationen und Quellen

[1] Dennis F. Shanahan, M.D., M.P.H.: Human Tolerance and Crash Survivability, citing Society of Automotive Engineers. Indy racecar crash analysis. Automotive Engineering International, June 1999, 87-90.

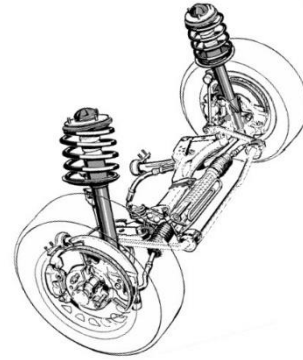
8. Schwingungsdämpfer

a) Einleitung und Motivation

Welche Aufgabe haben die Stoßdämpfer (physikalisch: Schwingungsdämpfer) eines Autos?

Vertikale Bewegungen, die durch Unebenheiten der Fahrbahn verursacht werden, beeinträchtigen den Fahrkomfort und könnten in extremen Situationen durch Aufschaukeln bei der Eigenfrequenz zu gefährlichen Fahrsituationen führen. Über die Federn der Stoßdämpfer des Autos werden die Bewegungen gedämpft. Diese Dämpfung ist darauf ausgelegt, dass die Störung möglichst geringe Auswirkungen auf die Fahrerkabine und deren Insassen hat.

Bei defekten Schwingungsdämpfern wird der Fahrkomfort beeinträchtigt, da die Schwingungen ungenügend gedämpft werden. In extremen Situationen könnten sich die Schwingungen so aufschaukeln, dass die Fahr- und die Lenksicherheit des Autos nicht mehr gewährleistet sind.



Um der Einhaltung von Geschwindigkeitsbegrenzungen auf Quartierstrassen Nachdruck zu verleihen, werden oftmals Fahrbahnschwellen eingebaut. – Im Experiment wird untersucht, wie sich ein Auto verhält, wenn es über eine Fahrbahnschwelle fährt und wie gut werden die resultierenden Schwingungen gedämpft werden.

Materialliste

2 Low-g-Beschleunigungssensoren
 Messwerterfassungssystem mit
 2 Sensoranschlüssen
 Klebeband

b) Vorbereitung und Durchführung des Experiments

Ein Beschleunigungssensor (Low-g) wird am vorderen und der zweite am hinteren Kotflügel lotrecht mit Klebeband fixiert. Die Kabel der beiden Sensoren werden durchs offene Fenster oder zwischen den Gummidichtungen der Türe und des Rahmens ins Innere des Autos geführt und dort vom Beifahrer an das Messwerterfassungssystem angeschlossen.



Beide Sensoren müssen vor dem Start der Messung noch auf null gesetzt werden.

c) Einstellungen der Messwerterfassung

Da maximal 2500 Datensätze erfasst werden können und die Messdauer für das Experiment bei etwa 5 Sekunden liegt, sollte eine möglichst hohe Rate gewählt werden.

Rate (samples/second)	<input type="text" value="500"/>
Rate (samples/second):	500
Interval (seconds/sample):	0.002
Duration (seconds):	4
Number of points:	2001

d) Durchführung des Experimentes

Da Schwellen oder aufgepflasterte Kissen meist in verkehrsberuhigten Straßen von Wohnquartieren vorkommen, muss beim Durchführen der Experimente auf andere Verkehrsteilnehmer und insbesondere spielende Kinder geachtet werden. Deshalb muss sich der Fahrer ganz auf die Fahrmanöver mit dem Auto konzentrieren können und eine zweite Person als Beifahrer die Datenerfassung durchführen.

Das Auto sollte soweit vor der Schwelle starten und so beschleunigt werden, dass es mit höchstens $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und möglichst konstanter Geschwindigkeit über die Schwelle fährt.

e) Auswertung der Messdaten

Im durchgeführten Experiment ist ein Opel Zafira (Radstand = Abstand der Achsen 2694 mm) mit den beiden montierten Beschleunigungssensoren mit geringer Geschwindigkeit über eine kissenartige Schwelle gefahren. Dabei erfahren die Vorder- und die Hinterachse beim Auffahren und Verlassen des Fahrbahnkissens eine Beschleunigung.

Die erfassten Beschleunigungswerte werden aus der Datenerfassungs-App *DataQuest* in *List&Spreadsheet* exportiert und danach mithilfe der numerischen Integration daraus die Werte der Momentangeschwindigkeit berechnet (vgl. v-t-Diagramm).

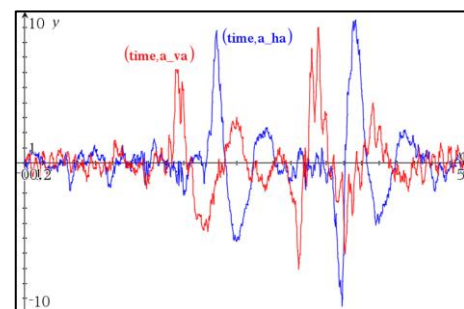
A	time	B a_va	C a_ha	D v_va	E v_ha	F
1	0.	0.1963	0.1627	0.1363	-0.0073	
2	0.005	0.1651	0.0325	0.1371	-0.0072	
3	0.01	0.1651	-0.2277	0.138	-0.0083	
4	0.015	0.0405	-0.0651	0.1382	-0.0086	
5	0.02	0.2586	-0.1627	0.1395	-0.0095	
6	0.025	0.3209	-0.3904	0.1411	-0.0114	
7	0.03	0.4144	-0.3904	0.1431	-0.0134	
8	0.035	0.1963	-0.0976	0.1441	-0.0138	

a-t-Diagramm

Die erfassten Messwerte der vertikalen Beschleunigung lassen in der Grafik das Auffahren der Vorderachse und kurze Zeit später der Hinterachse erkennen. Danach ist das Verlassen der Fahrbahnchwelle des Autos durch einen weiteren zeitverzögerten Anstieg der Beschleunigung an der Vorder- und Hinterachse klar erkennbar.

Die größere Amplitude der Hinterachse gegenüber der Vorderachse lässt sich allenfalls wie folgt begründen:

- Die Vorderachse ist härter gefedert oder
- Die Schwingung der Vorderachse wird durch das Chassis teilweise auf die Hinterachse (gekoppeltes System) übertragen.



v-t-Diagramm

Aus den Beschleunigungsmesswerten werden durch numerische Integration die Daten für das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm berechnet.

Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass zu Beginn der Messung, also im Zeitpunkt null die beiden Achsen in diesem Moment keine vertikale Bewegung ausführen, wird dieser Wert (v0_va, bzw. v0_ha) empirisch mit dem entsprechenden Schieberegler in der Graphik so eingerichtet, dass die Schwingung möglichst symmetrisch zur Zeitachse verläuft.

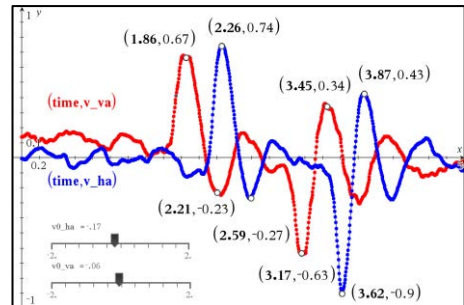
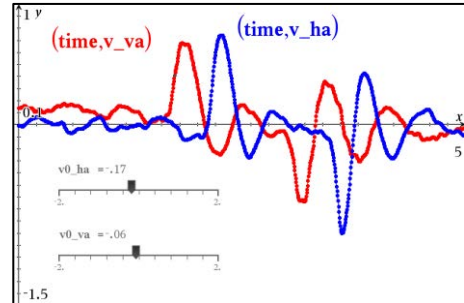
Durch die numerische Integration werden die Kurven geglättet und die Maxima und Minima sind klarer erkennbar.

Um die zeitlichen Abstände des Auffahrens bzw. des Verlassens des Fahrbahnkissens der Vorder- und Hinterachse berechnen zu können, werden die x-Koordinaten (= Zeit) der Minima und Maxima erfasst.

Aus diesen vier so erfassten Zeitdifferenzen wird als Nächstes der Mittelwert gebildet und mithilfe des Achsabstandes die Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet, mit der das Auto über das Fahrbahnkissen fährt.

Ebenso kann die Länge des Fahrbahnkissens berechnet werden. Mit der Zeitdifferenz zwischen den beiden Maxima, resp. Minima, der Vorder- und der Hinterachse und der Durchschnittsgeschwindigkeit lässt sich die Länge des Kissens berechnen.

A	time	B	a_va	C	a_ha	D	v_va	E	v_ha	F
=							v0_va+b/			
1	0.	0.1963	0.1627	v0_va+b/				-0.0073		



Zeitdifferenz der Peaks der Vorder- und Hinterachse:

dt1:=t1_ha-t1_va = 0.405
 dt2:=t2_ha-t2_va = 0.38
 dt3:=t3_ha-t3_va = 0.455
 dt4:=t4_ha-t4_va = 0.42

Mittelwert der Zeitdifferenzen:
 tm:=mean({ dt1,dt2,dt3,dt4}) = 0.415

Berechnung der durchschnittlichen Geschwindigkeit aus dem Achsabstand:
 $v := \frac{2.694}{tm} = 6.49 \text{ m/s}; \quad v \cdot 3.6 = 23.4 \text{ km/h}$

Zeitdifferenz der beiden Peaks von Auf- und Abfahrt:

dt5:=t3_va-t1_va = 1.31
 dt6:=t3_ha-t1_ha = 1.36
 dt7:=t4_va-t2_va = 1.24
 dt8:=t4_ha-t2_ha = 1.28

Mittelwert der Zeitdifferenzen:
 tm1:=mean({ dt5,dt6,dt7,dt8}) = 1.3

Berechnung der Länge des Fahrbahnkissens:
 lä:=v·tm1 = 8.4 m

Ein Vergleich mit den Werten eines Messbandes zeigt, dass die Berechnungen realistisch sind.



f) Diskussion und Interpretation

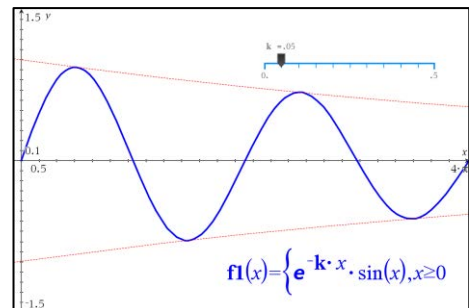
Qualität der Stoßdämpfer

Wie sind defekte Stoßdämpfer zu erkennen? – Die Karosserie eines Autos ist über Federbeine (Feder mit Hydraulikzylinder zur Dämpfung einer Auslenkung) auf den Radachsen abgestützt. Fährt nun ein Auto über eine Schwelle oder in ein Schlagloch, dann ändert sich die Kraft auf das Federbein kurzzeitig und die Feder wird zusammengedrückt oder gedehnt. Daraus resultiert nun eine Schwingung. Für einen guten Fahrkomfort muss diese jedoch schnell abklingen, d. h. sie soll stark gedämpft werden. Dafür ist der Hydraulikzylinder verantwortlich. – Defekte Stoßdämpfer sind also daran erkennbar, dass sie bei Auslenkung mehrfach nachschwingen.



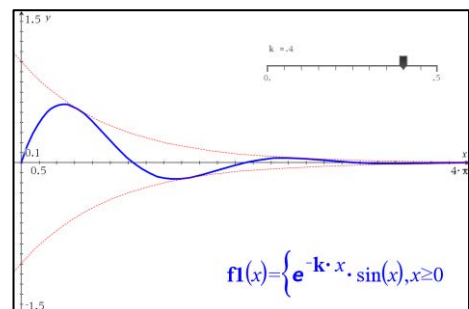
Bei schwacher Dämpfung nimmt die Amplitude nur langsam ab. Der Faktor k im Exponenten der e-Funktion ist entsprechend klein.

Einerseits wird der Fahrkomfort durch längeres Schaukeln eingeschränkt und andererseits kann sich das Fahrzeug gefährlich aufschaukeln, wenn mehrere Stöße in kurzen Zeitabschnitten erfolgen.



Bei der starken Dämpfung klingt die Schwingung relativ schnell ab und die Ruhelage wird schon nach kurzer Zeit erreicht.

Eine sehr starke Dämpfung wird als harte Federung empfunden, so dass der Fahrkomfort dann darunter leidet.



Um die Amplitude und den Dämpfungskoeffizienten bestimmen zu können, wird ein Intervall durch zwei verschiebbare Punkte auf der x-Achse definiert. Innerhalb dieses Intervalls kann eine Exponentialfunktion durch die Schieberegler der Parameter a (Amplitude) und k (Dämpfungskonstante) so angepasst werden, dass sie die Hüllkurve der einzelnen Schwingung möglichst gut annähert. Dabei muss die linke Intervallgrenze möglichst genau mit dem Start der Schwingung zusammenfallen.

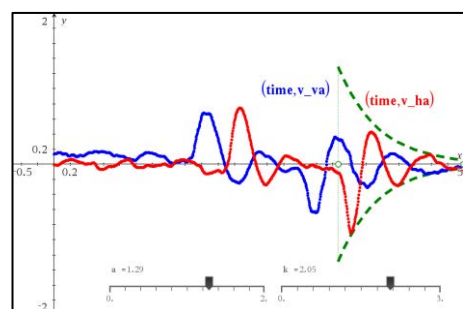
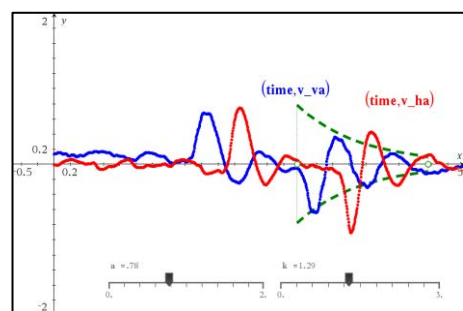
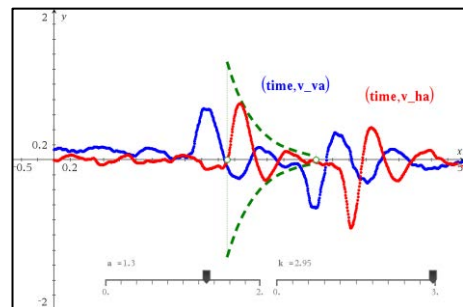
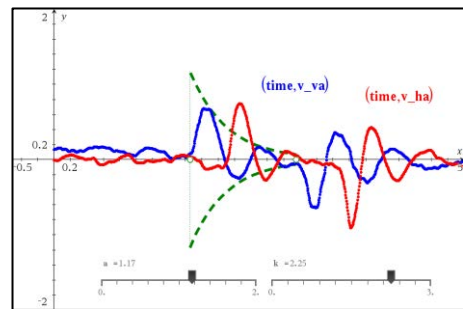
Mit diesem Instrument können die vier Schwingungsintervalle ausgewertet werden: Das Auffahren der Vorder- und Hinterachse, sowie das Abfahren der Vorder- und Hinterachse.

Dabei ist erkennbar, dass die Dämpfungskonstante der Stoßdämpfer der Vorderachse kleiner ist als diejenige der Hinterachse. Allerdings sind auch größere Differenzen zwischen Auf- und Abfahren vom Fahrbahnkissen erkennbar.

Mögliche Erklärungen für diesen Sachverhalt könnten unterschiedlich starke Stoßdämpfer an der Vorder- bzw. Hinterachse sein.

Da die Vorder- und Hinterachse über das Chassis verbunden ist, können diese auch nicht vollständig unabhängig voneinander schwingen, sondern sind eigentlich ein gekoppeltes System.

Nicht zuletzt darf auch der Einfluss weiterer Fehlerquellen und der Messungenauigkeit nicht vernachlässigt werden.





www.t3europe.eu

education.ti.com



Teachers Teaching with Technology™

 TEXAS INSTRUMENTS