

Physics on the Road: Smartphone-Experimente im Straßenverkehr

Christoph Fahsl¹, Patrik Vogt², Thomas Wilhelm³, Lutz Kasper⁴

¹Martin-Behaim-Gymnasium Nürnberg, ²PH Freiburg, ³Goethe Universität Frankfurt, ⁴PH Schwäbisch Gmünd
cfahsl@googlemail.com, patrik.vogt@ph-freiburg.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de,
lutz.kasper@ph-gmuend.de

Kurzfassung

Bei bisherigen Vorschlägen haben die mobilen Endgeräte meist die klassischen Messwerterfassungssysteme im Klassenzimmer ersetzt, wobei ein entscheidender fachdidaktischer Mehrwert des Messmittels „Smartphone“ unberücksichtigt blieb: die starke Verbreitung der Geräte im Alltag der Schülerinnen und Schüler sowie deren Mobilität. Im Projekt „Physics²Go!“ entwickeln und evaluieren wir Experimente unter Berücksichtigung dieser Aspekte. Sie ermöglichen das „Herausgehen“ aus dem Physiksaal, die experimentelle Erschließung von Alltagskontexten sowie die Auslagerung und Vertiefung experimenteller Inhalte in Form von Hausaufgaben. Der Artikel liefert hierfür Beispiele und stellt quantitative Versuche zum Kontext „Straßenverkehr“ vor. Diskutiert werden u. a. die Bestimmung des Strömungswiderstands- sowie Rollreibungskoeffizient verschiedener Fahrzeuge wie auch die Messung von Kurven- und Kreiseleradien.

Abstract

Previous proposals have mostly focused on the question how these new mobile devices can replace traditional data acquisition systems in the classroom while failing to recognise their biggest benefits from a teaching perspective: the widespread use of these devices in the everyday lives of students as well as their portability. In the project „Physics²Go!“, we develop and evaluate experiments taking into account these considerations in order to facilitate experiments in everyday contexts outside the physics lab. This also allows students to deepen their understanding of experiments at home, e.g. as part of a homework assignment. The article provides a range of examples and discusses quantitative experiments in the context of „road traffic“. Among other things, it will be discussed how the drag and rolling friction coefficient of different vehicles can be determined as well as how to measure curve and centrifugal radii.

1. Einleitung

Nachdem Smartphones und Tabletcomputer große Verbreitung bei Jugendlichen gefunden haben, werden sie mittlerweile auch im Physikunterricht verwendet [1]. Neben allseits bekannten negativen Effekten im Schulalltag können Mobiltelefone sowie Tablet-Computer den Physikunterricht an vielen Stellen bereichern; zum Beispiel bei der Dokumentation und Auswertung von Experimenten mittels Foto- bzw. Videofunktion, beim Austausch von Dateien unter Nutzung verschiedener Schnittstellen, bei der Durchführung von Internetrecherchen oder beim Einsatz der mobilen Endgeräte als Mess- und Experimentiermittel. Die in ihnen verbauten Sensoren ermöglichen originelle experimentelle Zugänge und teils überraschende Interpretationen bekannter Standardexperimente. Unser Projekt legt den Fokus auf den letztgenannten Punkt, in welchem die in Smartphones und Tablets verbauten Sensoren zur Durchführung quantitativer Schulversuche genutzt werden.

Zunächst stand die Konzeption einfacher Experimente im Vordergrund unserer Arbeit, die curricular valide sind und auf ähnliche Weise – lediglich mit anderen Materialien – ohnehin im Physikunterricht durchgeführt werden (z. B. schiefe Ebene, Stoßprozesse, freier Fall, u. a. [2], [3], [4]). Dadurch sollte das Messmittel „Smartphone“ ohne größere Anpassungen des Unterrichts in den Lernprozess integriert werden können – erfahrungsgemäß oftmals eine notwendige Voraussetzung für die Akzeptanz eines neuen Mediums bzw. einer neuen Konzeption. In einem zweiten Schritt legen wir nun den Schwerpunkt auf die wesentlichen Vorteile der modernen Mobiltelefone, die sich in ihrer starken Verbreitung bei den Jugendlichen und in ihrer hohen Mobilität zeigen. Sie ermöglichen das „Herausgehen“ aus dem Physiksaal, die experimentelle Erschließung von Alltagskontexten sowie die Auslagerung und Vertiefung experimenteller Inhalte in Form von Hausaufgaben. Dadurch wird gewissermaßen eine doppelte Kontextorientierung erreicht, indem die thematische Authentizität (Authentizität des Kontextes) mit einer

materialen Authentizität verknüpft wird, d. h. die Verwendung von Lern- und Arbeitsmaterialien, die für Schüler vertraut sind. Im Physiksaal selbst ist die Medienkonkurrenz groß (kommerziell vertriebene Messwerterfassungssysteme oder Videoanalyse-tools) und das Smartphone nicht immer die erste Wahl [1]. Im Folgenden wird eine Auswahl an Experimenten vorgestellt, welche den formulierten Anforderungen genügen und sich in den Kontext „Straßenverkehr“ einordnen lassen.

2. Rollreibungs- und Luftwiderstandskoeffizient von Fahrzeugen

Es wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem allein mittels des Beschleunigungssensors im Smartphone (trotz dessen Probleme [5]) der Strömungswiderstandskoeffizient (kurz c_w -Wert) eines Autos wie auch der Rollreibungskoeffizient von Reifen auf Asphalt bestimmt werden kann. Im schulischen Kontext wird die Luftreibung zwar erwähnt, im weiteren Unterrichtsverlauf – insbesondere bei quantitativen Analysen – jedoch größtenteils vernachlässigt. Motiviert durch die Tatsache, dass diese physikalische Größe wohl aufgrund ihrer schwierigen Messbarkeit an Beachtung verliert, entstand dieser Versuchsaufbau. Das prinzipielle Vorgehen, nämlich die Untersuchung von Ausrollvorgängen, ist nicht neu und wurde bereits vielfach publiziert. Zum Einsatz kamen hierbei bisher GPS-Empfänger (z. B. [6], [7]) sowie die in den Fahrzeugen verbauten Tachometern (z. B. [8], [9]). Wir möchten an dieser Stelle ein weiteres Verfahren vorschlagen, bei dem zur Bestimmung des Geschwindigkeitsverlaufs lediglich die in Smartphones verbauten Beschleunigungssensoren zum Einsatz kommen.

2.1. Theoretischer Hintergrund

Wir betrachten ein Auto der Masse m , das zunächst auf das Tempo v_0 beschleunigt, ehe der Fahrer auskuppelt und das Auto ausrollen lässt. Während des Ausrollens wirkt auf das Auto die Luftwiderstandskraft F_L sowie die Rollreibungskraft F_R , weshalb es nach und nach an Tempo verliert. Es gilt:

$$m \cdot a = F_L + F_R = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2 + \mu_R m g \quad \{1\}$$

$$\text{bzw. } a = \frac{1}{2} \frac{c_w \rho A}{m} v^2 + \mu_R g \quad \{2\}$$

Trägt man für den Ausrollvorgang den Beschleunigungsbetrag a und das Geschwindigkeitsquadrat in einem Koordinatensystem gegeneinander auf, so erhält man entsprechend oben formulierter Gleichung eine Gerade der Steigung

$$k = \frac{c_w \rho A}{2m} \quad \{3\}$$

und dem Ordinatenabschnitt

$$a_0 = \mu_R g. \quad \{4\}$$

Allein die Messung des Beschleunigungsverlaufs und der Bestimmung des Tempos beim Ausrollen ermöglicht somit die Bestimmung des c_w -Werts und des Rollwiderstandskoeffizienten (Abb. 1).

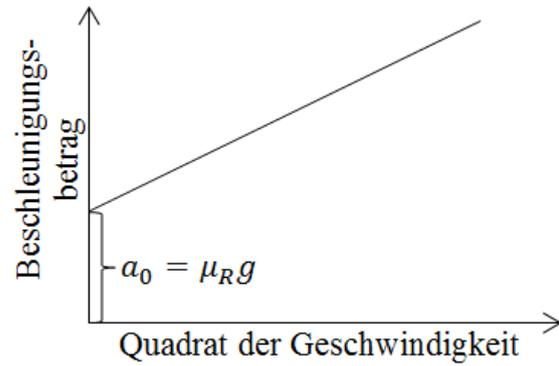


Abb. 1: Theoretisch zu erwartende Abhängigkeit von Beschleunigung und Geschwindigkeitsquadrat

Das Smartphone liefert direkt die Beschleunigung über der Zeit, die allerdings noch geglättet werden muss. Das Tempo muss dagegen erst durch numerisches Integrieren aus den Beschleunigungsdaten gewonnen werden.

Liest man direkt das Tempo vom Tachometer ab, muss man umgekehrt durch numerisches Differenzieren erst den Beschleunigungsbetrag aus dem Tempo ermitteln. Jedoch sind die Zahl der zu erzielenden Datenpunkte gering und der Ablesefehler des Geschwindigkeitsbetrages recht hoch. Hinzu kommt ein durch den Gesetzgeber vorgeschriebener Tachovorlauf, der laut EU-Richtlinie bis zu 10 % nach oben vom realen Wert abweichen darf, zuzüglich weiteren 4 km/h [10] (Abb. 2). Bei einem gefahrenen Tempo von 130 km/h darf die Tachoanzeige somit bereits um 17 km/h abweichen, was die Messergebnisse erheblich beeinflussen würde.

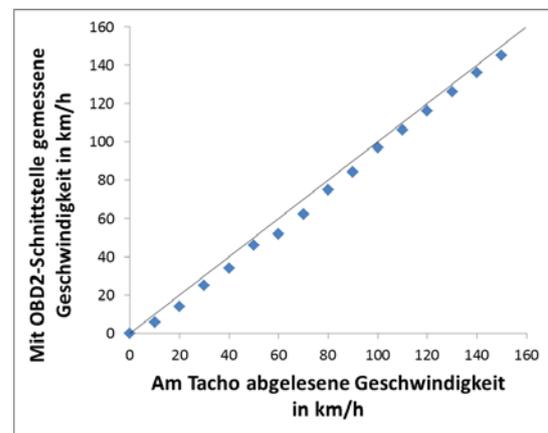


Abb. 2: Gegenüberstellung der mittels OBD2-Schnittstelle ([11], ausgelesen mit einem Smartphone und der App „DNT OBD2 Bluetooth“ [12]) bestimmten Geschwindigkeitsbetrag mit der Tachometeranzeige eines Kleinwagens (Opel Corsa). Im Messbeispiel liegt der Tachovorlauf im Mittel bei 14,5 %, die eingezeichnete Linie entspricht der Winkelhalbierenden.

Alternativ kann man auch aus dem Tempo die kinetische Energie und die kinetische Verlustleistung berechnen:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \Delta \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) / \Delta t \quad \{5\}$$

Für diese gilt:

$$P = (F_L + F_R) \cdot v \quad \{6\}$$

Da somit

$$P = \frac{1}{2} c_w \rho A v^3 + \mu_R m g v = a v^3 + b v \quad \{7\}$$

ist, lassen sich der c_w -Wert und der Rollwiderstandswert theoretisch auch nur aus dem Tempo bestimmen, indem man die kinetische Verlustleistung über dem Tempo aufträgt und eine Parabel dritten Grades anfügt. Problematisch ist allerdings, dass man den quadratischen und den konstanten Anteil in der Excel-Ausgleichskurve nicht versteht und vernachlässigen muss. Das spricht für die direkte Betrachtung der Beschleunigung.

Bei einer Messung mittels GPS ist das Problem, dass eigentlich nur Orte gemessen werden und man sowohl das Tempo durch numerisches Differenzieren des Ortes als auch den Beschleunigungsbetrag durch numerisches Differenzieren des Tempos ermitteln muss. Hierbei ist es wichtig, den vom GPS-Gerät bzw. von der GPS-App ermittelten Geschwindigkeitsbetrag heranzuziehen, der durch interne Glättungsverfahren besser ist, als wenn man selbst aus den Orten das Tempo ermitteln würde [6].

2.2. Versuchsdurchführung

Die wirksame Fläche bei einem Fahrzeug wurde mittels Zeichenprogramm ermittelt (Abb. 3). Denkbar wäre auch, diese zu ermitteln, indem man das Bild des Autos ausdruckt, exakt ausschneidet und wiegt.



Abb. 3: Die wirksame Fläche entspricht der Differenz aus der rot und der gelb markierten Fläche, welche mittels Zeichenprogramm ermittelt wurde.

Zur Versuchsdurchführung wurde das Smartphone in horizontaler Lage hinter der Mittelkonsole derart angebracht, dass seine Längsachse und somit die y-Achse des dreidimensionalen Beschleunigungssensors in Fahrtrichtung zeigt [2]. Da das Auto aus dem Stand beschleunigt werden muss, bietet sich ein gerader Autobahnabschnitt an, an dessen Beginn sich ein Parkplatz oder eine Raststätte befindet (Abb. 4).

Ehe auf die Autobahn aufgefahren wird, wird die Beschleunigungsmessung gestartet. Hierzu eignen sich zahlreiche Apps, z. B. Accelerometer Data Pro

[13] oder SPARKvue ([14], [15]). Beim Erreichen der gewünschten Höchstgeschwindigkeit (z. B. 130 km/h) kuppelt der Fahrer aus und lässt das Auto bis zu einem Tempo von etwa 80 km/h ausrollen¹, die Messung wird beendet. Um die eigene Sicherheit und die anderer Verkehrsteilnehmer nicht zu gefährden, ist die Messung unbedingt von einer zweiten Person und nicht vom Fahrer selbst durchzuführen!



Abb. 4: Google-Maps-Darstellung der genutzten Teststrecke; der Autobahnparkplatz befindet sich links oben.

2.3. Versuchsauswertung

Das nachfolgende Diagramm zeigt den Verlauf der relevanten Beschleunigungskomponente des gesamten Bewegungsvorgangs. Die ersten 30 Sekunden beschreiben den Beschleunigungsvorgang – man kann hier gut die Schaltvorgänge beobachten –, danach wurde ausgekuppelt und der Ausrollvorgang begonnen (Abb. 5).

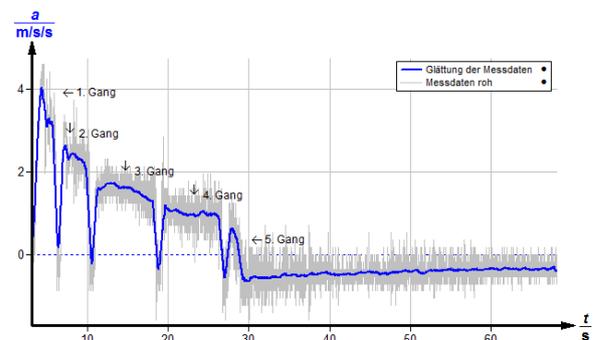


Abb. 5: Verlauf der Beschleunigungskomponente a_y während der gesamten Fahrt (grau: Rohwerte, blau: Glättung)

Integriert man den Beschleunigungsverlauf über die Zeit, so ist der Wert des Integrals zu jedem Zeitpunkt ein Maß für die entsprechende Geschwindigkeitskomponente v_y des Autos und damit auch für den Geschwindigkeitsbetrag v (Abb. 6).

¹ Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass eine Verkehrsbehinderung durch Langsamfahren ohne triftigen Grund einen Verstoß gegen die StVO darstellt. Auch bei geringem Verkehrsaufkommen darf also nicht beliebig weit abgebremst werden.

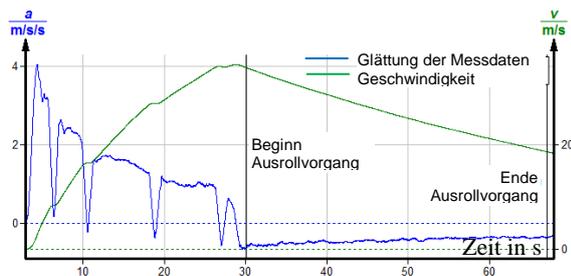


Abb. 6: $v_y(t)$ - und $a_y(t)$ -Diagramm der Autofahrt; der Geschwindigkeitsverlauf wurde durch numerische Integration mit Hilfe der Software „measure“ [16] aus den Beschleunigungsdaten ermittelt.

Im Versuch ergab sich bei dem Auto eine angeströmte Querschnittsfläche von $A = (2,22 \pm 0,05) \text{ m}^2$. Die Masse des Autos betrug $m = (1430 \pm 5) \text{ kg}$ und

die Luftdichte $\rho = (1,20 \pm 0,05) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Bei der Dichte der Luft ist zu beachten, dass Literaturwerte auf die gültige Höhe über dem Meeresniveau und auf die herrschende Lufttemperatur umgerechnet werden müssen.

Zur Bestimmung des Strömungswiderstandskoeffizienten c_w und des Rollreibungskoeffizienten μ_R wurde in Abb. 7 der Beschleunigungsbetrag gegen das Geschwindigkeitsquadrat für den Ausrollvorgang aufgetragen. Nach Durchführung einer linearen Regression kann nun der Strömungswiderstand und der Rollreibungskoeffizient unter Berücksichtigung der oben formulierten Gleichungen berechnet werden. Für drei Messwiederholungen ergeben sich die in Tab. 1 und Tab. 2 dargestellten Ergebnisse.

Messung	a_0 in ms^{-2}	Δa_0 in ms^{-2}	R^2	μ_R	$\Delta \mu_R$
1	0,1627	$0,9 \cdot 10^{-3}$	0,97	0,01659	$0,10 \cdot 10^{-3}$
2	0,3568	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,97	0,03637	$0,23 \cdot 10^{-3}$
3	0,2517	$0,8 \cdot 10^{-3}$	0,94	0,02566	$0,09 \cdot 10^{-3}$

Tab. 1: Die aus den Ordinatenabschnitten resultierenden Rollreibungskoeffizienten inklusive der Unsicherheiten (a_0 mittels linearer Regression bestimmter Ordinatenabschnitt, Δa_0 Fehler des Ordinatenabschnittes, R^2 Bestimmtheitsmaß, μ_R Rollreibungskoeffizient, $\Delta \mu$ Fehler des Rollreibungskoeffizienten (bestimmt mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung))

Messung	m in m^{-1}	Δm in m^{-1}	c_w	Δc_w
1	$0,343 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$	0,368	0,017
2	$0,3029 \cdot 10^{-3}$	$0,13 \cdot 10^{-6}$	0,325	0,016
3	$0,2674 \cdot 10^{-3}$	$0,11 \cdot 10^{-6}$	0,287	0,013

Tab. 2: Bestimmung des Strömungswiderstandskoeffizienten aus der Steigung k der Regressionsgeraden für drei Messwiederholungen

Größe	Volkswagen T3 Bus	Feuerwehrauto	Fahrradfahrer
Masse m	$2000 \pm 5 \text{ kg}$	$12\,442 \text{ kg}$	$86,5 \pm 0,1 \text{ kg}$
wirksame Fläche A	$3,17 \pm 0,05 \text{ m}^2$	$4,90 \pm 0,05 \text{ m}^2$	$0,6 \pm 0,05 \text{ m}^2$
Luftdichte ρ	$1,20 \pm 0,05 \text{ kgm}^{-3}$	$1,20 \pm 0,05 \text{ kgm}^{-3}$	$1,20 \pm 0,05 \text{ kgm}^{-3}$
Literaturwerte			
μ_R (Reifen auf Asphalt)	0,01 [19]	0,006-0,020 [17]	0,0022-0,005 [20]
c_w -Wert	0,51 [21]	0,8-1,5 [23]	1,0 [22]
Experimentelle Ergebnisse			
μ_R (Reifen auf Asphalt)	$0,0035 \pm 0,0006$	$0,0170 \pm 0,0004$	$0,02618 \pm 0,00021$
c_w -Wert	$0,501 \pm 0,023$	$1,49 \pm 0,07$	$1,12 \pm 0,07$

Tab. 3: Versuchswiederholung mit einem VW T3 Bus, einem Feuerwehrauto und einem Herrentourenrad

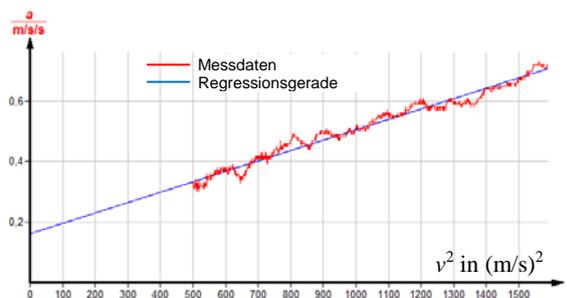


Abb. 7: Beschleunigungsbetrag in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsquadrats für den Ausrollvorgang

Bildet man die gewichteten Mittel, so ergibt sich das Endergebnis zu $\mu_R = 0,02275 \pm 0,00007$ und $c_w = 0,320 \pm 0,009$.



Abb. 8: Zusätzlich zum VW Beetle genutzte Fahrzeuge (oben: Volkswagen T3 Bus, unten links: Feuerwehrauto von MAN, unten rechts: Herrentourenrad)

In der Literatur wird der Rollwiderstandskoeffizient von einem Autoreifen auf Asphalt mit bis zu 0,015 angegeben [17]. Die hier auftretende Abweichung nach oben kommt vermutlich dadurch zustande, dass auch die vorhandene Nabenreibung der Rollreibung zugeschrieben wurde. Der c_w -Wert wird für das im Experiment verwendete Automodell vom Hersteller mit 0,37 angegeben [18] und stimmt somit sehr gut mit dem Messergebnis überein. Beim Nachschlagen des Luftwiderstands des jeweiligen Fahrzeuges ist es wichtig, den genauen Fahrzeugtyp zu kennen, da sich innerhalb der verschiedenen Baureihen durchaus größere Unterschiede bzgl. des c_w -Wertes ergeben. Äußere Einflüsse wie Gegen- bzw. Rückenwind

sowie leichte Unebenheiten in der Fahrbahn können Abweichungen verursachen.

Betrachtet man aber die Tatsache, dass lediglich ein Smartphone zur Bestimmung dieser physikalischen Größen herangezogen wurde (in der bisherigen Praxis erfolgen die c_w -Wert-Bestimmungen anhand aufwändiger Experimente in teuren Windkanälen), bewegt sich das Ergebnis erstaunlich nahe um den Literaturwert.

Zusätzlich wurden die Messungen mit einem Volkswagen T3 Bus, mit einem Feuerwehrauto als Beispiel für einen LKW und – zur Umsetzung des Experiments am Ende der Sekundarstufe 1 – mit dem Fahrrad wiederholt (Abb. 8). Auch hier ergeben sich, bei sonst analogem Vorgehen, reproduzierbare und mit der Literatur gut übereinstimmende Ergebnisse für den c_w -Wert (Tab. 3).

3. Kreisbewegung bei Kurven- und Kreiselfahrt

Neben der Bestimmung von Rollreibungs- und Strömungswiderstandskoeffizienten können Smartphones im Straßenverkehr u. a. zur Untersuchung von Kreisbewegungen eingesetzt werden, was auch eine Abschätzung von Krümmungsradien von Kurven und Verkehrskreiseln ermöglicht. Hierzu nutzt man entweder die Beziehung

$$r = \frac{v^2}{a} \quad \{8\}$$

(r Krümmungsradius, v Bahngeschwindigkeit, a Radialbeschleunigung) und greift auf die Beschleunigungssensoren in Fahrtrichtung sowie quer dazu zurück (Kap. 3.1) oder man geht vom Zusammenhang

$$r = \frac{a}{\omega^2} \quad \{9\}$$

aus und misst zusätzlich zur Radialbeschleunigung a die Winkelgeschwindigkeit ω mittels Gyroskop (Kap. 3.2).

3.1. Mit Beschleunigungssensoren in die Kurve

Zur Bestimmung von Kurvenradien allein mittels Beschleunigungssensoren muss das Smartphone horizontal und vertikal ausgerichtet sein. Zum Beispiel orientiert man das mobile Endgerät derart, dass sein Display horizontal ausgerichtet ist und seine Längsachse (y -Komponente des dreidimensionalen Beschleunigungssensors) in Fahrtrichtung zeigt. Die x -Achse des Beschleunigungssensors weist dann quer zur Fahrtrichtung. Für eine möglichst exakte Ausrichtung orientiert man das Smartphone so, dass im unbeschleunigten Zustand (am einfachsten in Ruhe) in x - sowie in y -Richtung keine Beschleunigungen gemessen werden, in z -Richtung näherungsweise die Erdbeschleunigung. Wie bereits bei dem Experiment zur Bestimmung von μ_R und c_w sollte bei der gewählten Teststrecke der Höhenunterschied vernachlässigbar klein sein und das Fahrzeug aus dem Stand beschleunigt werden.

Das Ergebnis einer Beispielmessung zeigt Abb. 9. Zunächst beschleunigt das Fahrzeug auf ein Maxi-

maltempo, ehe es sich mit annähernd konstanter Bahngeschwindigkeit weiterbewegt (ab ca. 6 s). Nach ca. 10 s beginnt die Kurvenfahrt und endet etwa 4 s später. Die Beschleunigung in Fahrtrichtung bleibt währenddessen nahe null, die Beschleunigung quer zur Fahrtrichtung (sie entspricht der Radialbeschleunigung) erreicht dagegen einen Maximalwert von über 3 m/s^2 . Nach dem Durchfahren der Kurve geht die Radialbeschleunigung auf null zurück, das Fahrzeug bremst zwischen 15 und 18 s ab („Bremspeak“ in Abb. 9).

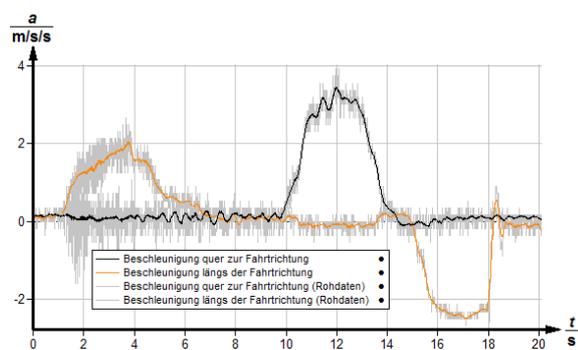


Abb. 9: Beschleunigungsverlauf längs und quer zur Fahrtrichtung

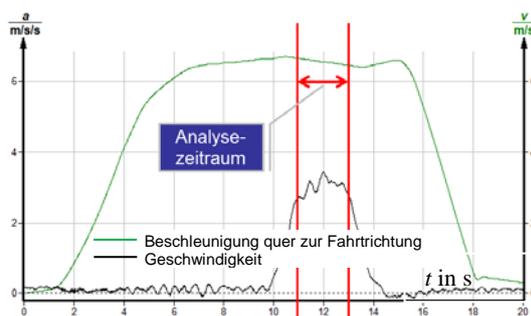


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf von Bahngeschwindigkeit und Radialbeschleunigung



Abb. 11: Gefahrene Kurve, dargestellt mit Google-Maps

Eine numerische Integration der geglätteten Beschleunigungsdaten in Fahrtrichtung liefert die Bahngeschwindigkeit des Fahrzeugs (Abb. 10). Zur Abschätzung des Kurvenradius berücksichtigt man lediglich die Daten der Kurvenfahrt und setzt für jeden Messzeitpunkt die Bahngeschwindigkeit und

die Radialbeschleunigung in Gl. {8} ein. Nach einer Mittelwertbildung und Durchführung dreier Messwiederholungen ergibt sich für die durchfahrene Kurve ein Krümmungsradius von $14,1 \text{ m}$, was gut mit der Vermessung einer Satellitenaufnahme (dargestellt mit Google-Maps) übereinstimmt – diese lieferte $(14 \pm 0,5) \text{ m}$ (Abb. 11).

3.2. Mit Beschleunigungssensor und Gyroskop im Verkehrskreisel

Für dieses Experiment benötigt man eine App, welche zusätzlich zu den Beschleunigungssensoren das in Smartphones verbaute Gyroskop ausliest (z. B. SensorLog [24]), da nun der Zusammenhang {9} zur Bestimmung des Krümmungsradius eines Verkehrskreisels herangezogen werden soll. Da zur Auswertung des Experiments keine numerische Integration nötig ist und diese unmittelbar mit den gemessenen Rohwerten erfolgen kann, ist das Verfahren weniger anspruchsvoll und zeitsparender als das in Kapitel 3.1 beschriebene.

Für die Versuchsdurchführung fährt man mit dem Auto in den Verkehrskreisel ein und der Beifahrer startet bei ausgerichtetem Smartphone (vgl. Kap. 3.1) und maximaler Abtastrate die Messung, wonach der Verkehrskreisel mindestens einmal durchfahren wird. Der aufgenommene Datensatz wird exportiert und am Computer ausgewertet. Abb. 12 zeigt den zeitlichen Verlauf von Winkelgeschwindigkeit und Radialbeschleunigung einer Beispielmessung.

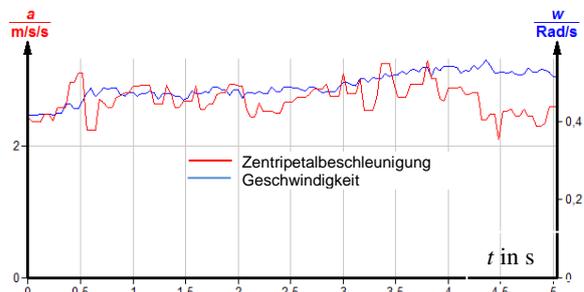


Abb. 12: Zeitlicher Verlauf der Radialbeschleunigung sowie der Winkelgeschwindigkeit bei der Kreiselfahrt

Bildet man nun den Quotienten aus der Beschleunigung und dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit, so erhält man entsprechend oben formulierter Beziehung für jeden Zeitpunkt den zugehörigen Radius der durchfahrenen Kreisbahn. Eine Mittelwertbildung liefert einen Radius von $11,4 \text{ m}$, was wiederum gut mit der Analyse einer Satellitenaufnahme übereinstimmt, die $(11 \pm 0,5) \text{ m}$ lieferte (Abb. 13). Da der genaue Ort des Smartphones in der Satellitenaufnahmen nur näherungsweise angegeben werden kann (etwa auf $\pm 0,5 \text{ m}$ genau), lässt sich der Abstand zum Drehzentrum mittels eines Seiles exakter ermitteln.

Beim Einsatz des Experiments im Physikunterricht sollte den Lernenden bewusst gemacht werden, dass hier die experimentelle Untersuchung der Kreisbewegung und speziell des Zusammenhangs {9} im

Vordergrund steht und nicht die Radiussschätzung als solche – letztere würde einfacher und mit höherer Genauigkeit auf konventionellem Wege gelingen. Der Vergleich der Abschätzung mit dem tatsächlichen Radius bestätigt jedoch die zu untersuchende Beziehung. Alternativ kann hier und in Kapitel 3.1 auch vom Radius ausgegangen und über die Messungen auf die Bahngeschwindigkeit des Fahrzeugs geschlossen werden.



Abb. 13: Für die Beispielmessung genutzter Kreisverkehr, inklusive Maßstab (Google-Maps-Darstellung).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Smartphones stellen ein vollwertiges Messwerterfassungssystem dar und ermöglichen einen niederschweligen Zugang zu physikalischen Messverfahren. Aufgrund ihrer starken Verbreitung bei Schülern und hohen Mobilität können experimentelle Inhalte in Hausaufgaben ausgelagert sowie Alltagsphänomene experimentell erschlossen werden. Durch dieses Vorgehen wird der immer wieder formulierten Forderung nach einer stärkeren Kontextorientierung des Physikunterrichts (z. B. [25]) im besonderen Maße Rechnung getragen: Die Schülerinnen und Schüler untersuchen eine authentische Alltagssituation mit einem Gerät, das ihnen aus dem Alltag bestens bekannt ist. Konkrete Beispiele aus dem Kontext „Straßenverkehr“ wurden in dem Artikel vorgestellt, viele weitere werden unter Verwendung einer preiswerten OBD2-Bluetooth-Schnittstelle derzeit erarbeitet, z. B. Zusammenhang von Spritverbrauch und Tempo, Abhängigkeit von Motordrehzahl und Tempo, Kühlwassertemperatur in Abhängigkeit der Fahrzeit und Tempo u. v. a. m.

5. Literatur

- [1] Wenzel, M.; Wilhelm, T. (2015): Erhebung zum Einsatz Neuer Medien bei Physik-Gymnasiallehrkräften - In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung 2015, www.phydid.de.
- [2] Vogt, P.; Kuhn, J.; Gareis, S. (2011): Beschleunigungssensoren von Smartphones: Beispielx-

perimente zum Einsatz im Physikunterricht. In: PdN-PhiS. 7/60, S. 15-23.

- [3] Vogt, P.; Kuhn, J. (2015): Elastische und inelastische Stöße mit den in Smartphones verbauten Beschleunigungssensoren. In: PdN-PhiS 1/64, S. 46-48.
- [4] Vogt, P. (2013): Akustische Bestimmung der Erdbeschleunigung. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik 138, S. 43-44.
- [5] Vogt, P. (2014): Smartphone Physics: Beschleunigungsmessungen im Physikunterricht – Lernanlässe oder Lernhindernisse? In: PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, Frankfurt a. M. 2014. (Verfügbar unter: www.phydid.de)
- [6] Braun, M.; Wilhelm, T. (2008): Das GPS-System im Unterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 57, Nr. 4, S. 20 – 27.
- [7] Ehlers C.; Backhaus, U. (2006): Analyse von Alltagsbewegungen mit GPS. CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physikertagung Kassel 2006.
- [8] Kwasnoski, J.; Murphy, R. (1985): Determining the aerodynamic drag coefficient of an automobile. In: American Journal of Physics 53, 776.
- [9] Ross, M.; DeCicco, J. (1994): Measuring the Energy Drain on Your Car In: Scientific American Volume 271, 6 S. 112-115.
- [10] Wie genau muss der Autotacho sein? In: Focus online. Verfügbar unter: http://www.focus.de/auto/ratgeber/auto-abc/auto-wie-genau-muss-der-autotacho-sein_aid_888296.html (Stand: 5/2015)
- [11] Für den Versuch wurde die Schnittstelle „OBD2 Bluetooth“ der Firma dnt verwendet; für technische Daten siehe: <http://www.dnt.de/OBD2-Bluetooth.2.html> (Stand: 5/2015)
- [12] Die genutzte OBD2-Schnittstelle wurde mit der App „DNT OBD2 Bluetooth“ ausgelesen. Verfügbar unter: <https://itunes.apple.com/PL/app/id687833172> (Stand: 5/2015)
- [13] Downloadmöglichkeit der App „Accelerometer Date Pro“: <https://itunes.apple.com/de/app/accelerometer-data-pro/id308757921> (Stand: 5/2015)
- [14] Downloadmöglichkeit der App „SPARKvue“ für iOS: <https://itunes.apple.com/de/app/sparkvue-hd/id552527324> (Stand: 5/2015)
- [15] Downloadmöglichkeit der App „SPARKvue“ für Android: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.isbx.pasco.Spark&hl=de> (Stand: 5/2015)
- [16] Downloadmöglichkeit der Software „measure“ von Phywe:

- <https://www.phywe.de/de/top/downloads/softwaredownload.html/> (Stand: 5/2015)
- [17] Wikipedia, Internetenzyklopädie (2014), Stichwort: „Rollwiderstand“. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Rollwiderstand> (Stand: 5/2015)
- [18] Volkswagen (2011). Runde Sache. Verfügbar unter: http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/dialog/testberichte/beetle_testberichte/beetle_ams_test_rundesache242011/_jcr_content/renditions/rendition.download_attachment.file/beetle_ams2411_070.pdf (Stand: 5/2015)
- [19] Stöcker, Horst. Taschenbuch der Physik, Harri Deutsch Verlag, 2010
- [20] BikeTech review (2010). Verfügbar unter: http://www.biketechreview.com/tires/images/AFM_tire_testing_rev8.pdf (Stand: 5/2015)
- [21] VW Bus Forum (2014). Verfügbar unter: http://www.vwbus-online.org/forum/board_entry.php?id=426547&page=0&order=time&category=0# (Stand: 5/2015)
- [22] Wilson, D. G. (2004). *Bicycling Science*. The Mit Press.
- [23] Joachim Herz Stiftung. Internetportal Leifi-Physik, verfügbar unter: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/reibung-und-fortbewegung/luftwiderstand>
- [24] Downloadmöglichkeit der App „SensorLog“: <https://itunes.apple.com/de/app/sensorlog/id388014573> (Stand: 5/2015)
- [25] Müller, R. (2006): Kontextorientierung und Alltagsbezug. In H. F. Mikelskis (Hrsg.), *Physikdidaktik* (S. 102-118). Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor.