

Erfassung von großräumigen zweidimensionalen Bewegungen mit GPS

Thomas Wilhelm*, Patrick Zeder*, Lukas Schauer*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main
wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Zunehmend mehr Lehrpläne schreiben vor, dass die Einführung in die Mechanik in der Sekundarstufe I anhand zweidimensionaler Bewegungen erfolgen soll. Die Videoanalyse von Bewegungen hat sich hier als Messwerterfassungsmöglichkeit bewährt. Es kann aber durchaus attraktiv sein, auch einmal großräumigere Bewegungen zu erfassen. Dazu eignet sich das GPS-System.

Im ersten Teil des Artikels werden sechs verschiedene Apps für Smartphones aufgezeigt, die als GPS-Tracker verwendet werden können, sowie drei Möglichkeiten der Datenauswertung und Darstellung. Außerdem werden Beispiele aufgenommener Bewegungen gezeigt.

Im zweiten Teil des Artikels wird aufgezeigt, dass Onlinedienste die GPS-Position von Flugzeugen in Echtzeit darstellen können, wie zum Beispiel „Flightradar24.com“. Wird hier von einem Flugzeug ein Bildschirmvideo aufgenommen, kann dieses mit Hilfe eines Videoanalyseprogrammes analysiert werden. Beispiele aufgenommener Bewegungen werden gezeigt.

1. Zweidimensionale Bewegungen

Traditionell geschieht die Behandlung der Kinematik und der Newton'schen Dynamik anhand geradliniger Bewegungen und erst sehr spät werden Wurf- und Kreisbewegungen betrachtet. Aus physikdidaktischer Sicht ist es jedoch sinnvoll, die physikalischen Größen der Kinematik anhand allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen einzuführen; dazu liegen auch verschiedene Unterrichtskonzeptionen vor [1]. Selbst die Einführung der Kraft und die Dynamik kann anhand allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen geschehen [2+3]. Entsprechend diesen Forschungsergebnissen fordern auch einige Lehrpläne, die Einführung in die Mechanik anhand mehrdimensionaler, zumindest zweidimensionaler Bewegungen von Objekten zu behandeln. Beispiele sind der Gymnasiallehrplan von Bayern [4], von Hamburg [5] und von Österreich [6].

Als Messwerterfassungssystem für ein- und zweidimensionale Bewegungen von Objekten hat sich die Videoanalyse bewährt [7]. Damit können Bewegungen im Klassenzimmer oder in der Sporthalle schnell analysiert werden. Möchte man auch großräumigere Bewegungen in der Ebene, wie von Fahrrädern, Autos oder Flugzeugen analysieren, ist dies mit der reinen Videoanalyse nicht mehr möglich. Hierfür wurde bereits mehrfach die Messung mit GPS vorgeschlagen [8+9]. Mittlerweile gibt es andere Möglichkeiten, GPS-Werte zu verwenden. Zum einen gibt es diverse Apps für Smartphones, zum anderen gibt es Webseiten, die die per GPS ermittelten Positionen von Flugzeugen in Karten und als Videos auf Webseiten darstellen.

2. Apps zur Erfassung und Auswertung von GPS-Daten

GPS-Empfänger werden im privaten Gebrauch seit Jahren verwendet und Schülerinnen und Schüler haben bereits Erfahrungen im Umgang mit „Google Maps“ oder Navigationsgeräten in Autos sammeln können. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass alle Schülerinnen und Schüler ein GPS-fähiges Smartphone besitzen.

2.1. GPS-Tracker für Smartphones im Vergleich

Im Folgenden werden sechs kostenfreie Apps für Smartphones zur Erfassung der GPS-Positionen vorgestellt [10].

Die bekannte App „phyphox“ ist sowohl für Android als auch für iOS verfügbar und bietet die Möglichkeit, viele Sensoren für verschiedene Experimente zu nutzen. Von Nachteil ist jedoch, dass die GPS-Daten nicht als gpx-Datei, sondern nur als xls- und csv-Datei exportiert werden können, man keine Einstellungsmöglichkeiten hat und das Smartphone während der Aufzeichnung nicht gesperrt sein darf.

Die App „Komoot“ ist ebenfalls für beide Plattformen verfügbar. Ein Export als gpx-Datei ist zwar möglich, aber der Datenexport ist umständlich. Leider sind auch keine Einstellungen möglich.

Die App „Geo-Tracker“ erlaubt den Export in verschiedene Dateiformate, hat eine übersichtliche Oberfläche und viele Möglichkeiten der Einstellung der Aufzeichnung. Allerdings gibt es sie nur für Android.

Die App „GPX-Tracker“ hat eine einfache Oberfläche, erlaubt den Export als gpx-Datei und hat keine Werbung und keine InApp-Käufe. Allerdings ist der

Datenexport umständlich und es gibt die App nur für iOS.

Bei der App „GPS-Tracker“ ist es möglich, vor Beginn der Messung verschiedene Einstellungen vorzunehmen und nach der Messung die Daten in verschiedene Dateiformate zu exportieren. Allerdings müssen die Einstellungen für jede Aufnahme einzeln geändert werden und es gibt die App nur für iOS.

Die App „GPS-Tracks“, die es nur für iOS gibt, erlaubt einen Export der Daten nur in der kostenpflichtigen PRO-Version. In der kostenfreien Version ist aber eine Anzeige in einer Karte und ein Diagramm des Geschwindigkeitsbetrages möglich.

Alle in diesem Artikel gezeigte Beispiele wurden mit der Android-App „Geo-Tracker“ aufgezeichnet und unterschiedlich ausgewertet [10].

2.2. Datenauswertung und Darstellung

Eine Möglichkeit für die Darstellung von aufgezeichneten Bewegungen ermöglicht die kostenlose Software „Google Earth“. Man kann Daten im gpx-Format per Drag and Drop einlesen und in Luftbildkarten der Erdoberfläche darstellen. Darüber hinaus bietet „Google Earth“ die Möglichkeit, den Geschwindigkeitsbetrag und die Höhe anzuzeigen. Darin kann der jeweilige Geschwindigkeitsbetrag an verschiedenen Messpunkten abgelesen werden und gleichzeitig zeigt ein Pfeil auf der Karte den zugehörigen Ort auf der Bahnkurve an. Durch Markieren eines Bereiches im Diagramm kann dieser in der Karte hervorgehoben werden. Abbildung 1 zeigt im oberen Teil die Bahnkurve einer Zugfahrt und im unteren Teil das Zeitdiagramm des Geschwindigkeitsbetrages sowie die Höhe. In beiden Teilen ist der mittlere Abschnitt zwischen zwei Bahnhöfen rot markiert.



Abb. 1: Karte mit Bahnkurve einer Zugfahrt von Gelnhausen nach Offenbach in „Google Earth“ mit einem Zeitdiagramm von Höhe und Geschwindigkeitsbetrag (Kartendaten ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert) (2024) Bilder ©2024 TerraMetrics)

Der Geschwindigkeitsbetrag zwischen den ersten beiden Bahnhöfen im ersten Drittel des Diagramms wurde zusätzlich in Excel dargestellt (siehe Abb. 2). Im Vergleich erkennt man, dass es sich bei „Google Earth“ um geglättete Daten handelt. Außerdem kann man sehen, dass der Zug beim Anfahren und Abbremsen je eine relativ konstante tangentielle Beschleunigung hat und dazwischen ein relativ konstantes Tempo.

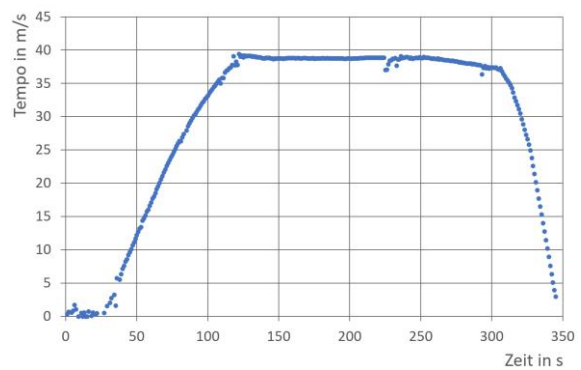


Abb. 2: Geschwindigkeitsbetrag einer Zugfahrt, dargestellt in Excel

Die Anzeige von gpx-Daten ist auch auf speziellen Webseiten möglich. Bei der Webseite von Jürgen Berkemeier kann eine gpx-Datei per Drag and Drop hineingezogen werden (<https://www.jberkemeier.de/ShowGPX.html>). Neben einer Routendarstellung auf einer Karte können ein Ort-Höhe-Diagramm, ein Ort-Geschwindigkeitsbetrag-Diagramm und ein Geschwindigkeitsbetrag-Höhe-Diagramm dargestellt werden.

Für weitere Datenmanipulationen bzw. das gleichzeitige Anzeigen und Vergleichen von verschiedenen Messungen bietet „Microsoft Excel“ zahlreiche Möglichkeiten. Entsprechende Excel-Vorlagen-Dateien für eigene Messwerte sind downloadbar unter <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Smartphone-GPS.htm>.

2.3. Beispiele

Zur Einführung der GPS-Messung und zur Eintübung der gewählten Software können Schülerinnen und Schüler versuchen, GPS-Bilder zu zeichnen (siehe Abb. 3).

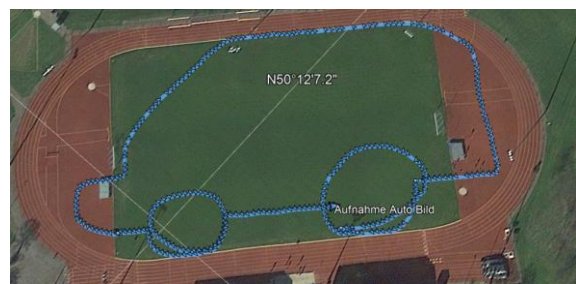


Abb. 3: gelaufene Bahnkurve in der Form eines Autos, aufgenommen mit „Geo-Tracker“ und dargestellt in „Google Earth“ (Kartendaten ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert) Bilder ©2024 AeroWest, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies)

Vor dem Versuchsbeginn sollten sich die Schülerinnen und Schüler ein Motiv überlegen, welches sich möglichst in einem Zug auf einer Fläche zeichnen lässt. Dieses Motiv laufen sie im Anschluss auf einer großen Fläche wie dem Schulhof oder dem Sportplatz ab. Vor Aufzeichnungsbeginn sollten die Genauigkeitseinstellungen der Geräte überprüft werden, damit es keine Sprünge in den Aufnahmen gibt. Nach

erfolgreichen Versuchen kann auch mit einer zwischenzeitlichen Pausierung der Aufnahme experimentiert werden, um komplexere Bilder zu zeichnen. Zur Behandlung von geradlinigen Bewegungen mit näherungsweise konstanter Geschwindigkeit (gleichförmige Bewegung) eignen sich verschiedene 100 m-Läufe mit jeweils konstantem Tempo (Messabstände in „Geo-Tracker“: 1 s). In „Google Earth“ erscheinen dann in der Karte je nach Tempo unterschiedlich viele Messpunkte im gleichen Streckenabschnitt. Eine genauere Analyse ist in Excel möglich (siehe Abb. 4).

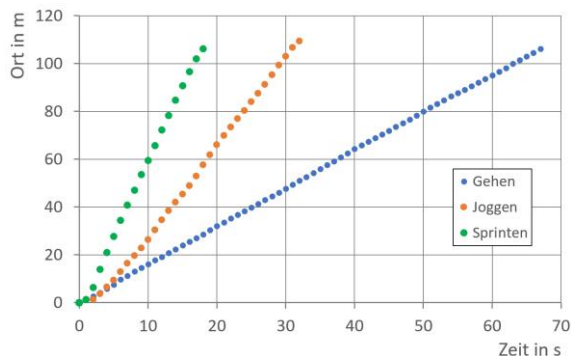


Abb. 4: Zeit-Ort-Diagramm eines 100 m-Laufes in „Excel“ für Gehen, Joggen und Sprinten

Zur Behandlung von geradlinigen Bewegungen mit näherungsweise konstanter Beschleunigung (gleichmäßig beschleunigte Bewegung) ließ sich eine Person auf einem Fahrrad einen Hang mit einem gleichmäßigen Gefälle ($\alpha = 5,79^\circ$) hinunterrollen. Abbildung 5 zeigt die Bahnkurve in „Google Earth“ und die Orte, die stets in einem zeitlichen Abstand von einer Sekunde gemessen wurden. An den zunehmenden Abständen zwischen den Messpunkten erkennt man eine Beschleunigung.



Abb. 5: Zeit-Ort-Marken eines bergab rollenden Fahrrades (Kartendaten ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dld/by-2-0 (Daten verändert) Bilder ©2024 AeroWest, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies)

Eine weitere Auswertung in „Excel“ (siehe Abb. 6) zeigt eine konstante Beschleunigung mit $0,54 \text{ m/s}^2$, was nur etwa halb so groß ist, wie aufgrund der Hangabtriebskraft zu erwarten wäre ($0,99 \text{ m/s}^2$), was vor allem an der Rollreibung liegt.

Zur Aufnahme einer gleichmäßigen Kreisbewegung steht eine Person in der Mitte eines Kreises und hält das Ende eines Maßbands fest. Eine zweite Person hält in der einen Hand das andere Ende des Maßbandes und in der anderen Hand das Smartphone, um einen Kreis mit möglichst konstantem Tempo abzulaufen. Alternativ können Kreise auch vorher mit Seil und Kreide auf den Boden gezeichnet werden. Die

Größe der Radien sollte nicht zu gering gewählt werden; hier wurde ein Radius von circa 15 m gewählt. In „Excel“ ist es nun mit einem Makro möglich, Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeile in einem x-y-Diagramm an die aufgenommene Bahnkurve zu zeichnen (siehe Abb. 7). Man sieht, dass sich die Geschwindigkeit permanent ändert und dies eine Beschleunigung zum Kreisinneren ergibt. Eine entsprechende Excel-Vorlage gibt es unter <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Smartphone-GPS.htm>.

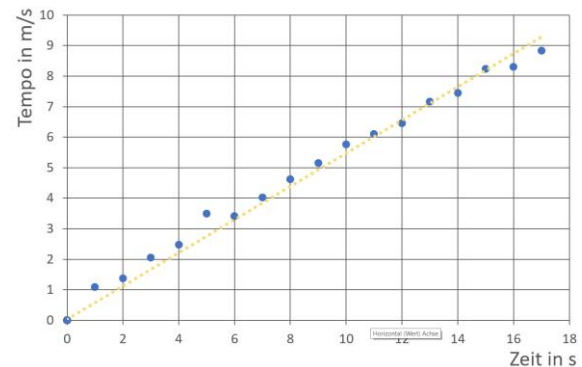


Abb. 6: Zeit-Geschwindigkeitsbetrag-Diagramm eines bergab rollenden Fahrrades

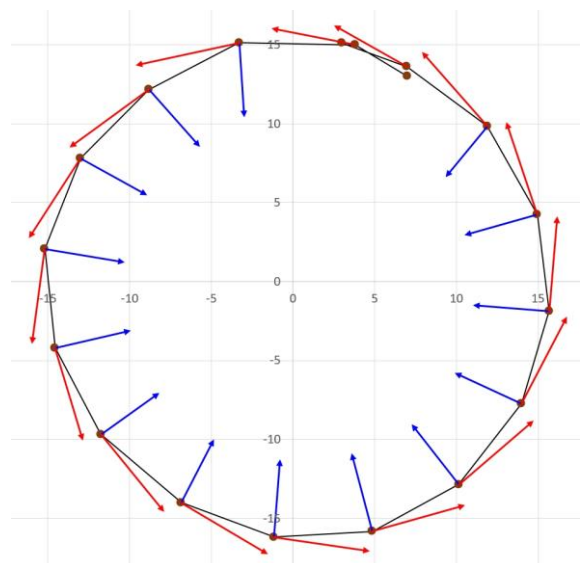


Abb. 7: x-y-Diagramm eines gelaufenen Kreises mit Geschwindigkeitspfeilen (rot) und Beschleunigungspfeilen (blau)

3. GPS-Positionen von Flugzeugen

3.1. Erfassen von Flugbewegungen für den Physikunterricht

Flugzeuge lassen sich täglich am Himmel beobachten. Es gibt heutzutage verschiedene Onlinedienste, die die GPS-Position von Flugzeugen in Echtzeit darstellen, z.B. „ADS-B Exchange“, „AirNav“ und „Flightradar24.com“. Bis auf wenige Ausnahmen senden alle modernen Verkehrsflugzeuge der zivilen Luftfahrt Signale über ADS-B-Sender (80 % in Europa und 60 % in den USA). Die Signale enthalten

unter anderem die GPS-Positionsdaten des Flugzeugs, aber auch zusätzliche Informationen wie Flugzeugtyp, Geschwindigkeitsbetrag, Höhe und Außen-temperatur. Diese Daten können von entsprechenden Empfängern empfangen und via Internet übertragen werden (Radarspotting).

Nach eigenen Angaben hat „Flightradar24“ weltweit über 20.000 ADS-B-Empfänger. Dadurch sind die meisten Regionen der Welt größtenteils und Europa und USA sogar komplett abgedeckt. Die ADS-B-Daten werden in Echtzeit ins Internet eingespeist – ausgenommen sind jedoch Daten der Federal Flight Administration, die aufgrund amerikanischer Regularien erst mit fünf Minuten Verzögerung angezeigt werden. Das betrifft aber hauptsächlich den nordamerikanischen Flugraum.

Von „Flightradar24“ existiert neben der Webanwendung zusätzlich eine App für Android und iOS. Die Basisversion der Anwendung, die für diese Anwendung ausreicht, ist kostenfrei, für zusätzliche Features kann ein Abo abgeschlossen werden.

So kann man mit „Flightradar24“ Flugbewegungen in Echtzeit am Bildschirm verfolgen. Macht man davon ein Bildschirmvideo, kann man dieses gut mit einer Videoanalysesoftware auswerten. Zum Aufnehmen von Bildschirmvideos gibt es viele Möglichkeiten. Das 2012 entstandene „Open Broadcaster Software Studio“ (OBS-Studio) ist Open Source und kostenlos erhältlich sowie auf den Plattformen Windows, MacOS, Linux und FreeBSD anwendbar. Mit dem Screen-Recorder lassen sich Desktopaufnahmen mit frei wählbarer Auflösung, Framerate und Formatausgabe erstellen.

Die entstandenen Videoaufnahmen werden mit einer Videoanalysesoftware analysiert und die Ergebnisse dargestellt. Auch wenn die Geschwindigkeit von Flugzeugen hoch ist, wirkt die Bewegung auf der Karte relativ langsam. Deshalb ist es sinnvoll, das Bildschirmvideo mit sehr geringer Framerate aufzunehmen und eine Videoanalysesoftware zu verwenden, die diese Framerate erkennt oder einstellen lässt. Hilfreich ist es auch, wenn man in der Videoanalysesoftware das Abspieltempo erhöhen kann oder einstellen kann, dass nur jede n-te Frame angezeigt wird. Optimal ist die Kombination von geringer Framerate und Anzeige jedes n-ten Frames. Hier wurde die Software „measure dynamics“ verwendet.

3.2. Beispiele

Für das erste Beispiel [11] wurde die Playback-Funktion von „Flightradar24“ genutzt, mit der sich bereits vergangene Flüge abspielen lassen. Somit ist bereits eine Bahnkurve sichtbar, an der ein kleines gelbes Flugzeug entlang fliegt (siehe Abb. 8). In Wirklichkeit handelt es sich hier um eine zweimotorige Piper PA31T Cheyenne II. Da die Bewegung von „Flightradar24“ bei der Playbackfunktion im Zeitraffer abgespielt wird, erhält man zu hohe Werte für Geschwindigkeit und Beschleunigung und kann die Videoanalyse nur noch qualitativ nutzen.

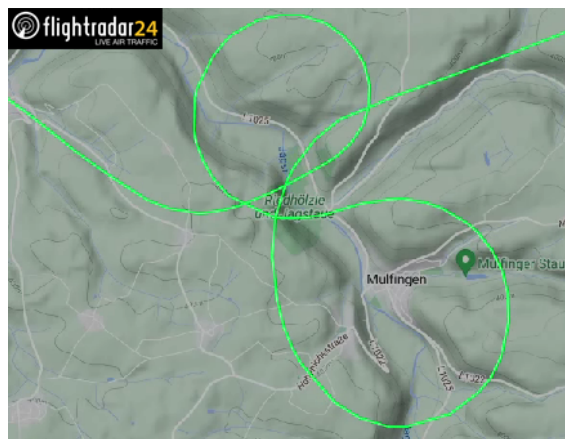


Abb. 8: Im Bildschirmvideo ist schon die exakte Bahnkurve eingezeichnet (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://www.flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

Für die Abbildung 9 wurden in der Videoanalysesoftware in gewissen Abständen Ort und Geschwindigkeit berechnet. Schließlich wurden an jeden zweiten erfassten Ort orange Kreise als Zeit-Ort-Marken und blaue Pfeile als Geschwindigkeiten eingezeichnet. Die Geschwindigkeitspfeile zeigen damit die Bewegungsrichtung und das Tempo des Flugzeugs an. Man sieht, dass das Flugzeug mit hohem Tempo ankam und vor Beginn der Kurve langsamer wurde.

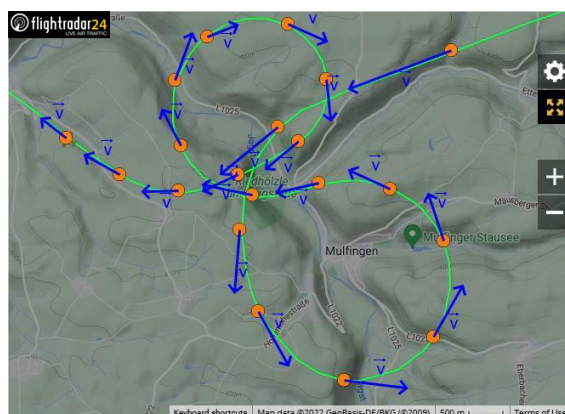


Abb. 9: Geschwindigkeitspfeile zeigen die Bewegungsrichtung und das Tempo des Flugzeugs (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://www.flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

Die Abbildung 10 zeigt nun, wie an jedem Zeitpunkt aus der alten Geschwindigkeit (grün) des letzten Zeitpunktes und der aktuellen Geschwindigkeit (blau) die Geschwindigkeitsänderung (rot) berechnet wird, so dass gilt: $\vec{v} = \vec{v}_{alt} + \Delta\vec{v}$. Der Geschwindigkeitsänderungspfeil wurde zusätzlich noch ein zweites Mal direkt an die Zeit-Ort-Marke gezeichnet.

Abbildung 11 zeigt die Geschwindigkeit und die Beschleunigung bei diesem Flugmanöver.

Geradlinige beschleunigte Bewegungen von Flugzeugen findet man beim Start und bei der Landung. In Abbildung 12 sind die Geschwindigkeitspfeile und

Beschleunigungspfeile beim Start eines Flugzeugs im Abstand von zehn Sekunden eingezeichnet. Man erahnt, dass es sich in etwa um eine konstante Beschleunigung handelt.

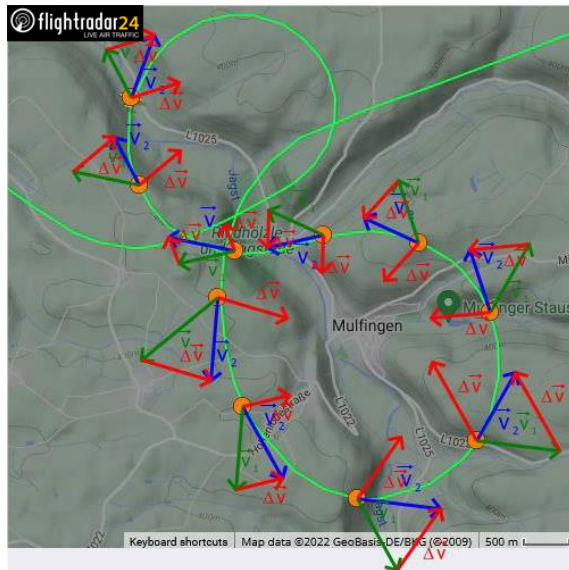


Abb. 10: Darstellung zur Erzeugung von Geschwindigkeitsänderungsvektoren (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

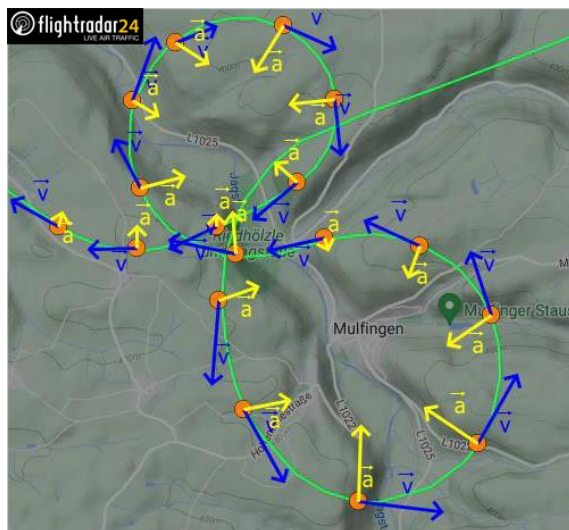


Abb. 11: Geschwindigkeitspfeile (blau) und Beschleunigungspfeile (gelb) der Bewegung des Flugzeugs (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

Abbildung 13 zeigt, wie der Geschwindigkeitsbetrag zunimmt. Allerdings ist der Wert unrealistisch, da Verkehrsflugzeuge mit einem Tempo zwischen 250 km/h = 70 m/s und 345 km/h = 96 m/s starten. Laut „Flightradar24.com“ handelt es sich um einen Airbus A320 214, der mit ca. 270 km/h = 75 m/s abhebt.

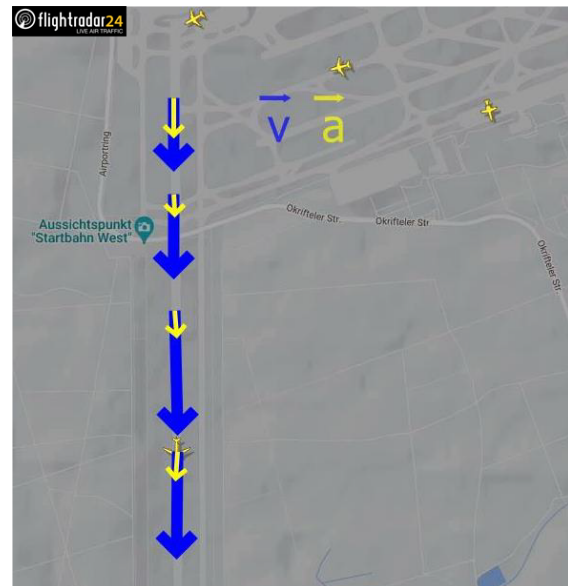


Abb. 12: Geschwindigkeitspfeile (blau) und Beschleunigungspfeile (gelb) beim Start eines Flugzeugs (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

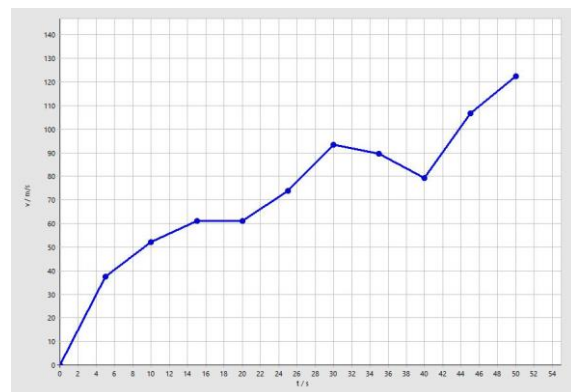


Abb. 13: Tempo beim Start eines Flugzeugs

In Abbildung 14 sind die Geschwindigkeitspfeile und Beschleunigungspfeile bei der Landung eines Flugzeugs eingezeichnet. Man sieht, wie das Tempo abnimmt und man kann vermuten, dass eine annähernd konstante Beschleunigung vorliegt.

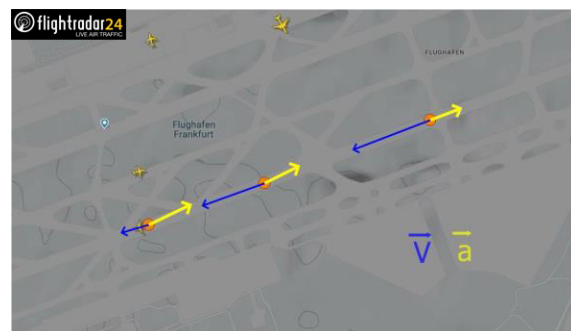


Abb. 14: Geschwindigkeitspfeile (blau)- und Beschleunigungspfeile (gelb) bei der Landung eines Flugzeugs (mit freundlicher Genehmigung von [Flightradar24.com](https://flightradar24.com), Map data ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009) dl-de/by-2-0 (Daten verändert))

4. Fazit

Mit den heute zur Verfügung stehenden Apps und Programmen kann man großräumige Bewegungen aufzeichnen und im Physikunterricht auswerten, um so attraktive Bewegungen anschaulich zu analysieren. Eine Möglichkeit ist die Aufzeichnung eigener Bewegungen mit Apps auf dem eigenen Smartphone, eine andere Möglichkeit ist die Nutzung der aufgezeichneten Positionen von Flugzeugen. Leider gibt es aber noch keine App, in der die Datenaufnahme, Datenauswertung und Datendarstellung in der gleichen App so möglich ist, wie man das gerne für den Physikunterricht hätte.

5. Literatur

- [1] Wilhelm, Thomas (2021): Unterrichtskonzeptionen zur Kinematik. In: Wilhelm, Thomas; Schecker, Horst; Hopf, Martin (Hrsg.): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht, Springer-Spektrum, S. 51 – 80, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-63053-2>
- [2] Wilhelm, Thomas; Tobias, Verena; Waltner, Christine; Hopf, Martin; Wiesner, Hartmut (2012): Einfluss der Sachstruktur auf das Lernen Newtonscher Mechanik. In: Bayrhuber, H.; Harms, U.; Muszynski, B.; Ralle, B.; Rothgangel, M.; Schön, L.-H.; Vollmer, H.; Weigand, H.-G. (Hrsg.): Formate Fachdidaktischer Forschung. Empirische Projekte – historische Analysen – theoretische Grundlegungen, Fachdidaktische Forschungen, Band 2, Waxmann, Münster/New York/München/Berlin, S. 237 - 258
- [3] Spatz, Verena; Hopf, Martin; Wilhelm, Thomas; Waltner, Christine; Wiesner, Hartmut (2018): Eine Einführung in die Mechanik über die zweidimensionale Dynamik. Die Wirksamkeit des Design-Based Research Ansatzes, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, Volume 24, Issue 1, S. 1 – 12, <https://rdcu.be/RwyO>
- [4] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (o.J.): LehrplanPLUS Bayern Gymnasium, <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/8/physik>
- [5] Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Schule und Berufsbildung (2023): Bildungsplan Gymnasium Sekundarstufe I Physik, <https://www.hamburg.de/re-source/blob/798534/4cf0047ad61ef-facd1ff7e6ad819fa41/physik-data.pdf>
- [6] Bundesministerium Bildung, Wissenschaft und Forschung (2023): Lehrplan der Allgemeinbildenden höheren Schule, https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2023_II_1/Anlagen_0012_E1BFCE6_7E8B_4ACF_AEFD_3EC8_71222138.pdf
- [7] Gößling, A.; Becker, S.; Wilhelm, T.; Kuhn, J. (2023): Bewegungen analysieren mittels digitaler Videoanalyse. In: Wilhelm, T. (Hrsg.): Digital Physik unterrichten. Grundlagen, Impulse, Perspektiven, Klett Kallmeyer, Hannover, S. 40 – 70
- [8] Braun, M.; Wilhelm, T. (2008): Das GPS-System im Unterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 57, Nr. 4, S. 20 - 27
- [9] Schüttler, M.; Wilhelm, T. (2011): Physik im Freizeitpark – Möglichkeiten und Vergleich von Beschleunigungs- und GPS-Messung sowie Videoanalyse. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/238/410>
- [10] Zeder, Patrick (2023): Bewegungsaufnahmen mit GPS im Physikunterricht, Staatsexamensarbeit Goethe-Universität Frankfurt am Main, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Smartphone-GPS.htm>
- [11] Schauer, Lukas (2022): Analyse von Flugbewegungen mit Flightradar24, Staatsexamensarbeit Goethe-Universität Frankfurt am Main, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/flightradar24.htm>