

Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung für
das Lehramt an Haupt- und Realschulen

Im Fach Physik,
eingereicht der Hessischen Lehrkräfteakademie
-Prüfstelle Frankfurt am Main-

Thema:
Analyse von Flugbewegungen mit Flightradar24

Verfasser:
Lukas Schauer

Gutachter:
Prof. Dr. Thomas Wilhelm

Inhalt

Einleitung.....	1
1. Didaktische Grundlagen	3
1.1 Frankfurt/Münchener-Konzeption	3
1.2 Alltagsvorstellung	4
1.2.1 Ort und Weglänge	5
1.2.2 Geschwindigkeit	5
1.2.3 Beschleunigung.....	6
1.2.4 Kreisbewegung.....	7
1.2.5 Beschleunigung zu einem bestimmten Zeitpunkt.....	7
1.3 Einordnung in den Lehrplan	8
1.3.1 Hauptschule.....	8
1.3.2 Realschule	8
1.3.3 Gymnasium.....	9
1.4 Videoanalyse	10
1.4.1 Dynamisch-ikonische-Repräsentation	10
1.4.2 Multimodalität.....	12
1.4.2 Multicodalität.....	12
1.4.3 Interaktivität.....	13
1.4.4 Cognitive Load Theory.....	13
1.4.5 Vorteile der Videoanalyse gegenüber anderen Messverfahren	15
2. Physikalische Grundlagen.....	16
2.1 Die Newton'schen Axiome	16
2.2 Massenpunkt	17
2.3 Bezugssystem	17
2.4 Ortsvektor	18
2.5 Geschwindigkeit	18
2.6 Beschleunigung.....	19
2.7 Gleichförmige Kreisbewegung	20
3. Verwendete Programme.....	22
3.1 Flightradar24.....	22
3.2 OBS-Studio (Video-Aufnahmeprogramm)	23
3.3 measure dynamics	23
3.3.1 Grundlegende Funktionsweise von measure dynamics	24
3.3.2 Analyse.....	24
3.3.3 measure dynamics Oberfläche	25

3.3.4 Eingrenzen des Videos	25
3.3.5 Skalierung	26
3.3.6 Automatische und manuelle Analyse	26
3.3.7 Diagramme	27
3.3.8 Filter	28
3.3.9 Messfehler	28
4. Anwendungsvorschläge.....	30
4.1 Einführung der Geschwindigkeit	30
4.2 Einführung der Beschleunigung.....	33
4.3 Reduktion zur eindimensionalen Bewegung.....	36
4.4 Vektorielle Zusammensetzung der Geschwindigkeit	37
4.5 Vom Vektor zum Diagramm	40
4.7 Leistung beim Start.....	45
4.7 Messfehler	47
4.8 Winkelgeschwindigkeit und Zentripetalbeschleunigung	50
5. Allgemeine Hinweise und Probleme bei der Durchführung.....	54
6. Fazit.....	55
7. Literaturverzeichnis.....	56
8. Abbildungsverzeichnis	60
9. Anhang.....	61

Einleitung

Die Kinematik ist ein Teilgebiet der Physik, das die Beschreibung von Bewegungen behandelt. In unserer Welt sind Bewegungen täglich zu sehen und zu erleben. Gerade deshalb lassen sich Bewegungen sehr leicht messen und dadurch kennenlernen. Trotzdem oder gerade durch den ständigen Kontakt und den damit entstandenen Alltagserfahrungen und -vorstellungen, haben viele Schülerinnen und Schüler Probleme mit der Thematik.¹ Die Gründe dafür sind vielfältig, seien es die unterschiedlichen Interessen oder die subjektive Interpretation der Alltagserfahrungen. Menschen sammeln im Laufe ihres Lebens Erfahrungen mit physikalischen Phänomenen und Begriffen und bilden so ihr eigenes Verständnis zu diesen.² So ist es nicht verwunderlich, dass Studien belegen, dass Schülerinnen und Schüler bereits mit eigenen Vorstellungen zu den Begriffen Weg, Zeit, Geschwindigkeit und Beschleunigung in den Unterricht kommen, die ihnen den Zugang zu diesen Begriffen und deren Konzeptualisierung im Physikunterricht erschweren. Sie verwechseln Ort und Weg oder setzen Beschleunigung mit dem Schnellerwerden eines Gegenstandes gleich. Die Behandlung exakt geradliniger und konstanter eindimensionaler Bewegungen zur Einführung in die Thematik kann diese Vorstellungen nur sehr schwer korrigieren, da sie für die Schülerinnen und Schüler künstlich wirkt.³ Um bei den Lernenden ein verbessertes Verständnis für die newtonsche Mechanik zu erreichen, kann die Frankfurt-/Münchener-Konzeption⁴ genutzt werden, die zur Einführung das zweidimensionale Bewegungsmodell in Verbindung mit Videoanalyse benutzt.

Die eindimensionalen Bewegungen werden als Spezialfall behandelt, wodurch sich abweichende Schülervorstellungen leicht zu erkennen und berichtigen sind. Zusätzlich wird der Vektorcharakter von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen hervorgehoben. Die

¹ Vgl. Wilhelm 2008

² Vgl. Wolf et al. 2012, S. 66

³ Vgl. Wilhelm 2008

⁴ Vgl. Schecker et al. 2018, S. 54

Videoanalyse eignet sich hierfür hervorragend: Alltägliche Phänomene lassen sich einfach aufzeichnen und analysieren und dient daher als zielführendes Hilfsmittel im Physikunterricht.

Zu den Bewegungen, die sich täglich beobachten lassen, gehören unter anderem Flugzeuge am Himmel. Mit der Software FlightRadar24 kann man Flugbewegungen in Echtzeit am Bildschirm verfolgen. Macht man davon ein Bildschirmvideo, kann man dieses gut mit der Videoanalysesoftware „measure dynamics“ auswerten. Die Bewegung kann unter anderem durch Stroboskopbilder und Diagramme nachvollzogen werden.

In der vorliegenden Arbeit soll gezeigt werden, ob und wie sich die Analyse von Flugbewegungen, die auf flightradar24.com in Echtzeit übertragen werden, dazu eignet, im Physikunterricht eingesetzt zu werden. Dazu wird theoretisch untersucht, wie sich die Begrifflichkeiten und dazugehörigen Konzepte von Ort, Tempo, Geschwindigkeit oder Beschleunigung einzuführen lassen und mögliche Übungen für Schülerinnen und Schülern aufgezeigt.

1. Didaktische Grundlagen

1.1 Frankfurt/Münchner-Konzeption

Die grundlegende Idee der Frankfurt/Münchner-Konzeption ist das Verwenden des vektoriellen Geschwindigkeitsbegriffs und somit das Betrachten von zweidimensionalen Bewegungen. Dies soll den Zugang und die Weiterführung des Themas für Schülerinnen und Schüler erleichtern.⁵

Schon in den 1970er Jahren begann Jung⁶ mit Untersuchungen zu einem neuen Mechanik Konzept und stellte seine Erkenntnisse im Buch „Mechanik für die Sekundarstufe I“ vor. Dieses Konzept wurde später von Wiesner übernommen und weiterentwickelt.⁷ Seit 2007 wird das Konzept unter anderem von Hopf, Wilhelm und Wiesner weiterentwickelt und empirisch untersucht.⁸

Der wichtigste Grundgedanke dieses Konzepts für die Newtonsche Mechanik ist das zweite newtonsche Axiom. Die Geschwindigkeitsänderung und insbesondere auch die Richtungsänderung, die durch Krafteinwirkung verursacht wird, steht dabei im Mittelpunkt. Durch eine geschickte Einführung sollen Schülerinnen und Schüler diese Idee schon früh nachvollziehen können. Die Frankfurt/Münchner-Konzeption findet vor allem in der Dynamik, einem Teilgebiet der Physik seine Anwendung. Da für das qualitative Verständnis der Dynamik auch kinematische Größen verstanden werden müssen, bietet es sich an schon in der Kinematik zweidimensional zu beginnen, um die Grundsteine für das spätere Verständnis zu legen. Die Konzeption sieht vor, dass durch gezielte Unterrichtssequenzen Anknüpfungspunkte geschaffen werden, welche auf „[...] Schülervorstellungen aufbauen, die nicht (oder wenig) mit der physikalischen Betrachtungsweise kollidieren. Gleichzeitig wird versucht zu vermeiden, lernhinderliche Vorstellungen bei den Schülerinnen und Schülern zu aktivieren oder erzeugen.“⁹

⁵ Vgl. Wilhelm et al. 2021, S. 61f & S. 100f

⁶ Vgl. Jungl 1977

⁷ Vgl. Wiesner 1992

⁸ Vgl. Wilhelm et al. 2021, S. 100

⁹ Wilhelm et al. 2021, S. 100

Im Rahmen der Frankfurt/Münchner-Konzeption spielt der Einsatz von Videoanalyse eine besondere Rolle, denn durch sie können relevante physikalische Größen wie z.B. Vektoren, breite Pfeilen oder Säulen in Form von dynamisch ikonischen Repräsentationen veranschaulicht werden.

1.2 Alltagsvorstellung

„Ohne die Kenntnis des Standpunktes des Schülers ist keine ordentliche Belehrung des Selben möglich“ Disterweg (1850)¹⁰

Bei der Planung von Unterricht denkt man intuitiv zunächst an die Fachinhalte oder die zu erwerbenden Kompetenzen, schaut auf den Lehrplan oder in das Schulbuch. Man überlegt sich, in welcher Reihenfolge welche neuen Begriffe in welcher Form eingeführt werden.¹¹ Fachdidaktische Erhebungen zeigen allerdings, dass Lernende zu vielen Themen schon ihre eigenen Vorstellungen mit in den Unterricht bringen. So hielt Duit schon 1993 fest, dass Schüler „nicht als leere unbeschriebene Blätter in den Unterricht kommen“.¹² Die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler decken sich oft nicht mit den wissenschaftlichen Tatsachen.¹³ Wenn Lernende in ihrem Alltag zuvor schon mit physikalischen Begriffen konfrontiert wurden, haben sie oft tief verankerte Vorstellungen zu den Begriffen, Phänomenen und Prinzipien gebildet und das ohne, dass ihnen die physikalischen Hintergründe bekannt waren. Diese Vorerfahrungen sind nur schwer zu korrigieren und häufig Ursache vieler Lernschwierigkeiten¹⁴ oder ernst zu nehmenden Missverständnissen im Unterrichtsgespräch.¹⁵ Durch Vorerfahrung ergibt sich auch der Trugschluss zur vermeintlich einfachen Erlernbarkeit des Themengebiets. Zudem weisen die Schülerinnen und Schüler dem für

¹⁰ Disterweg in Krüger et al. 2018, S.49

¹¹ Vgl. Schecker 2018, S. 2

¹² Duit 1993, S. 4

¹³ Krüger et al. 2018, S. 49

¹⁴ Vgl. Kircher 2020, S. 338

¹⁵ Mikelskis 2006, S. 52

die Physik zentralen Vektorpfeil nur eine untergeordnete Rolle zu. Sie betrachten die Phänomene mit Denkmustern, die sich im Alltag bewährt haben, jedoch legt der Physikunterricht Wert auf die theoretischen Beschreibungen.¹⁶ Nicht nur die jungen Schülerinnen und Schüler haben gefestigte Vorstellungen von den physikalischen Vorgängen: So stellte eine aktuelle Studie von Burde et al. (2021) heraus, dass auch junge Erwachsene und physikinteressierte mit unausgereiften Vorstellungen in das Physikstudium starten.¹⁷ Die Schülervorstellungen zur Mechanik sind mittlerweile ausgiebig erforscht¹⁸. Im Folgenden sind die für diese Arbeit wichtigsten Schülervorstellungen zu den physikalischen Phänomenen zusammengefasst.

1.2.1 Ort und Weglänge

Der Ort eines Objektes zu einer bestimmten Zeit im Koordinatensystem wird durch seinen Vektor angegeben. Genauso verhält es sich auch mit der Weglänge. Im traditionellen Unterricht werden beide Begriffe meist eindimensional eingeführt, indem sich Objekte vom Nullpunkt beginnend nur in die positive Koordinatenrichtung. Infolgedessen haben der Ort und die zurückgelegte Wegstrecke den gleichen Vektor. Eine Unterscheidung fällt den Schülerinnen und Schülern deshalb häufig schwer. Führt man hingegen die Begriffe im zweidimensionalen Raum können Verwechslungen vermieden werden. Der ‚Ort‘ wird als Punkt im Bezugssystem angegeben, während die ‚Weglänge‘ die Distanz der Bahnkurve ist.¹⁹

1.2.2 Geschwindigkeit

Ähnlich verhält es sich mit der Geschwindigkeit. Sie dient häufig nur dazu anzugeben, wie schnell oder langsam sich ein Objekt bewegt, meist sogar ohne Richtungs- sondern lediglich mit Zielangabe. Man bewegt sich hin und her, hoch oder runter, vor oder zurück oder im Kreis. Die Geschwindigkeit wird demnach im Alltag ohne ihre momentane

¹⁶ Vgl. Schecker 2018, S.64

¹⁷ Vgl. Burde et al. 2021

¹⁸ Vgl. Schecker 2018

¹⁹ Vgl. Wilhelm 2005, S. 13

Orientierung auf eine positive skalare Größe reduziert.²⁰ Durch den Unterricht im eindimensionalen Raum kann diese Vorstellung kaum verändert werden, sondern diese sich sogar festigen. Denn bei eindimensionalen Bewegungen äußert sich die Richtung nur durch die Änderung des Vorzeichens. Beim Übergang in die zweite Dimension kann dies daher zu erheblichen Schwierigkeiten führen. Die Kreisbewegung wird folglich als konstante Geschwindigkeit ohne Beschleunigung angesehen. Durch die Anwendung der vereinfachten Formel $v = \frac{s}{t}$ wird diese Fehlvorstellung weiter verstärkt. Um dem entgegenzuwirken, sollte die allgemeine Formel $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ genutzt werden, da hier Zeit- und Ortsunterschiede deutlich gemacht werden. Zusätzlich sollten Lehrkräfte bei der Nutzung von skalaren ‚Geschwindigkeiten‘ stattdessen vom ‚Tempo‘ sprechen, um den Unterschied zu verdeutlichen.²¹

1.2.3 Beschleunigung

Beschleunigung bedeutet für viele Schülerinnen und Schüler, dass das Tempo eines Objekts zunimmt. Für sie ist die Beschleunigung eine Bilanzgröße, die sich durch den Vergleich von Anfangs- und Endgeschwindigkeit ergibt. Folglich werden große Beschleunigungen mit großen Endgeschwindigkeiten assoziiert. Die Beschleunigung wird als eine ähnliche Größe wie das Tempo angesehen. In der Physik ist die Beschleunigung die zweite Ableitung des Ortes nach der Zeit. Sie ist somit aber eine eigenständige Verhältnisgröße, die als Quotient nicht nur die Geschwindigkeitsänderung, sondern auch die zeitliche Änderung berücksichtigt. Eine große Beschleunigung innerhalb eines kurzen Zeitintervalls führt daher nicht zwangsläufig zu einer großen Tempoänderung.²²

Eine weitere Fehlvorstellung ist, dass Beschleunigung ausschließlich als Schnellerwerden wahrgenommen wird. Beispielsweise wird bei Autos bei der Zunahme der Geschwindigkeit von Beschleunigung gesprochen, bei

²⁰ Vgl. Schecker 2018, S. 65

²¹ Vgl. Wilhelm 2005, S. 14

²² Vgl. Schecker 2018, S. 66

der Abnahme der Geschwindigkeit hingegen aber vom Abbremsen. Für viele Schüler klingt ‚negative Beschleunigung‘ daher erst einmal „unlogisch“. ²³

Folgendes ist in der Lehre zu beachten: Wenn Schülerinnen und Schüler die Beschleunigung als Änderung des Geschwindigkeitsbetrags wahrnehmen, bedeutet das für sie, dass positive Beschleunigung ein Schneller- und negative Beschleunigung ein Langsamerwerden ist. Jedoch hat eine negative Beschleunigung in negativer Richtung aber auch die Zunahme der Geschwindigkeit zur Folge. ²⁴

Gleichzeitig ist physikalisch betrachtet jede Änderung des Geschwindigkeitsvektors eine Beschleunigung. Das heißt selbst bei gleichbleibender Geschwindigkeit, liegt eine Beschleunigung vor, sobald sich die Richtung ändert. Vielen Schülerinnen und Schüler fällt diese Vorstellung schwer. Deutlich wird dies beispielsweise bei der Betrachtung einer gleichförmigen Kreisbewegung, bei der während des Vorgangs ein Körper kontinuierlich beschleunigt wird, sein Tempo aber unverändert bleibt. ²⁵

1.2.4 Kreisbewegung

Bei einer Kreisbewegung kann eine weitere Fehlannahme hinzukommen: „Bewegt sich ein Objekt im Kreis, dann prägt sich diese Bewegungsform dem Objekt ein. Sie klingt erst allmählich aus, wenn der Kreis verlassen wird.“ ²⁶ So wird bei der Frage nach der Bewegungsform nach dem Wegfall der Beschleunigung in einer Kreisbewegung häufig eine gekrümmte Bahnkurve, statt einer tangentialen Bewegung angegeben.

1.2.5 Beschleunigung zu einem bestimmten Zeitpunkt

Bei der Frage nach der Beschleunigung zu einem bestimmten Zeitpunkt offenbart sich, dass in der Schülervorstellung die Änderung der Geschwindigkeit immer eine gewisse Zeitspanne benötigt. Auffällig wird das bei Umkehrpunkten beispielsweise beim Versuch des senkrechten

²³ Vgl. Schecker 2018, S. 66

²⁴ Vgl. Wilhelm 2005, S.16

²⁵ Vgl. Schecker 2018, S. 69

²⁶ Vgl. Schecker 2018, S. 69

Wurfs. Hier wird häufig keine Beschleunigung angegeben, da der Ball kurz stillsteht, bevor sich seine Geschwindigkeit wieder ändert.²⁷

1.3 Einordnung in den Lehrplan

Das Kultusministerium Hessen stellt mit den Lehrplänen Unterrichtsrichtlinien²⁸ für Lehrkräfte zur Verfügung. Sie bilden seit dem Schuljahr 2011/12 die curriculare Grundlage des Unterrichts in der Primarstufe und der Sekundarstufe I. Sie halten fest, welche Kenntnisse die Schülerinnen und Schülern im Laufe ihrer Schulbahn und zu bestimmten Abschnitten erwerben sollen. Die vom Kultusministerium ausgegebenen Lehrpläne gelten für alle Schulen, wenn diese kein eigenes Schulcurriculum entwickelt haben. In jedem Fall müssen sich die individuell entwickelten Schulcurricula an den Kompetenzerwartungen des Bildungsstandards halten.

1.3.1 Hauptschule

In der Hauptschule wird das Thema Mechanik erstmals in der achten Klasse behandelt. Hier sollen die physikalischen Hintergründe erarbeitet werden. Im Fokus steht die Begriffsbildung zur Geschwindigkeit und zur Beschleunigung ebenso wie die Anwendung von Weg-Zeit-Diagrammen. Die Schüler sollen befähigt werden Geschwindigkeiten selbst zu messen und die Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit zu unterscheiden. In der Abschlussklasse sollen sie Messreihen zur Bewegung erstellen, diese graphisch darstellen und interpretieren können.

1.3.2 Realschule

Die achte Jahrgangsstufe der Realschule befasst sich mit dem grundlegenden Begriff der Kraft. In diesem Lernabschnitt geht es hauptsächlich um Kräfte und ihre Wirkungen, beinhalten die fakultativen Unterrichtsinhalte zusätzlich die gleichförmige und geradlinige Bewegung (eindimensionale Bewegung). Erst in der zehnten Klasse befassen sich die Lernenden mit den verschiedenen Bewegungsarten,

²⁷ Vgl. Schecker 2018, S. 69

²⁸ Vgl. Hessisches Kultusministerium

deren Unterscheidung und Gesetzmäßigkeiten. Im Curriculum wird auch explizit der Einsatz von Computern als digitale Mess- und Zeiterfassungsgeräte sowie die Animation zur Veranschaulichung von Bewegungsabläufen aufgelistet.

1.3.3 Gymnasium

Im Gymnasium wird das Thema Bewegungen bereits in der siebten Klasse behandelt. Hierbei wird darauf hingewiesen, den Sachverhalt der Geschwindigkeit phänomenologisch und praktisch zu behandeln, um daraus leichter auf die Änderung von Bewegungszuständen zu schließen.

Ab der zehnten Jahrgangsstufe wird dann der Computer als Messsystem und die Auswertung von Messungen genutzt. Nach Abschluss der zehnten Klasse sollen die Schülerinnen und Schüler dann in der Lage sein die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten, Begriffe und Zusammenhänge erklären zu können.²⁹

²⁹ Vgl. Hessisches Kultusministerium

1.4 Videoanalyse

Aufgrund der Möglichkeiten und Chancen, die der Einsatz neuer Medien in der Vermittlung von Inhalten bietet, sind diese fester Bestandteil des hessischen Curriculums.³⁰

Zu den ‚neuen Medien‘ gehören Smartphones, Tablets und Computer unter dem passende Einsatz von Software zum multimedialen Lernen. Eines dieser Tools, dessen Anwendung sich im Physikunterricht anbietet, ist die Videoanalyse. Die Videoanalyse ist in der Anwendung sehr benutzerfreundlich und im Vergleich zu anderen Messverfahren auch für Schülerinnen und Schüler leicht zu verstehen.³¹ Durch ihre intuitive Anwendung lassen sich viele Vorgänge aus dem Alltag der Schülerinnen und Schüler einfangen, visualisieren und zu Lernzwecken nutzen und kann deshalb für viele motivierend sein. Zudem ist die Videoanalyse, vielen Lernenden aus dem Fernsehen bekannt. Ihr Einsatz kann daher nicht nur das Interesse wecken, sondern auch zu selbstständigem und entdeckendem Lernen beitragen, wenn die Schülerinnen und Schüler verschiedenste Experimente am Computer analysieren.³² Durch die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten der Videoanalyse wird einen fächerübergreifenden Einsatz ermöglicht, die Medienkompetenz schult und Einblicke in wissenschaftliche Arbeitsweisen gegeben. Nach Wilhelm kann durch die Videoanalyse der Erkenntnisgewinn gesteigert und bekannte Fehlvorstellungen korrigiert werden.³³ Das gelingt besonders durch die dynamisch-ikonische Repräsentation.

1.4.1 Dynamisch-ikonische-Repräsentation

Forschungsergebnisse zeigen, dass das Erschließen von Zusammenhängen neuer Inhalte vielen Schülerinnen und Schülern schwerfällt, besonders, wenn dazu Daten aus Messungen interpretiert werden müssen.³⁴ Denn zur Interpretation von Daten müssen

³⁰ Vgl. Hessisches Kultusministerium

³¹ Vgl. Unterrichtphysik 2002, S. 30

³² Vgl. Suleder 2010, S. 29

³³ Vgl. Wilhelm 2005

³⁴ Vgl. Baumert 2000

verschiedene Informationen aufgenommen und verarbeitet werden. Daher ist es wichtig, bei der Aufbereitung dieser Daten möglichst abstrakte Darstellungen zu vermeiden, um einer kognitiven Überlastung entgegenzuwirken.

Hier kommen dynamisch-ikonische-Repräsentationen ins Spiel. Darunter versteht man im Allgemeinen die bildhafte Darstellung physikalischer Größen, die sich während eines laufenden Experiments verändern. Nach Heuer³⁵ gehören neben Pfeilen und Vektoren auch Linien, Säulen oder Flächen, deren Flächeninhalt den Betrag einer physikalischen Größe darstellt dazu. Aber auch Animationen oder Piktogramme zählen hierbei, wenn sie sich entsprechend einer physikalischen Größe bewegen oder verändern. Auch Wilhelm³⁶ führt an, dass diese Darstellungsform helfen kann physikalische Vorgänge zu veranschaulichen. Wenn beispielsweise Pfeile im Video eingeblendet und dynamisch mit einer Animation mitlaufen, können Zusammenhänge leicht erkannt werden, ohne dass zusätzlich Graphen interpretiert werden müssen. Die dynamisch-ikonische Repräsentation kann auch zur Erarbeitung mentaler Modelle nützlich sein. So kann die externe Repräsentation die Bildung interner Bilder unterstützen, um so die Erarbeitung mentaler Modelle hierfür aufzubauen.³⁷

Zusätzlich lässt sich auch die Aufmerksamkeit auf bestimmte Informationen lenken.

Die dynamisch-ikonische Repräsentation ist aber nur ein Vorteil der Videoanalyse. Sie ist zudem interaktiv, nutzt Multimodalität und Multicodierung und ist deshalb auch aus pädagogischer und lernpsychologischer Sicht interessant, da dies Einfluss auf die Motivation, die Kausalattribution und Verarbeitung hat.³⁸

³⁵ Vgl. Heuer 1996, S. 12

³⁶ Vgl. Wilhelm 2002

³⁷ Vgl. Wilhelm 2005, S. 39f

³⁸ Vgl. Kircher et al. 2020, S. 460

1.4.2 Multimodalität

Die Multimodalität beschreibt die Zusammenarbeit verschiedener sensorischer Wahrnehmungssysteme. Durch die Nutzung von mehreren Sinneskanälen können unterschiedliche Aspekte von Inhalten betont werden und weiterführende Zusammenhänge und Wechselbezüge lassen sich dadurch erschließen. So kann die Wissensaufnahme erleichtert werden³⁹. Die Videoanalyse spricht vor allem den visuellen Sinneskanal an. Aber es lassen sich beispielsweise auch akustische Phänomene mit Diagrammen koppeln, um bestimmte Details zusätzlich hervorzuheben und so die Aufmerksamkeit darauf zu lenken.

1.4.2 Multicodalität

Ähnliche Vorzüge wie die Multimodalität besitzt auch die Multicodierung indem sie durch die Anwendung unterschiedlicher Symbolsysteme zur Verdeutlichung eines Sachverhalts beiträgt. So stellte schon Weidenmann fest „[...] mit Multicodierung und Multimodalität gelingt es besonders gut, komplexe authentische Situationen realitätsnah zu präsentieren und den Lerngegenstand aus verschiedenen Perspektiven, in verschiedenen Kontexten und auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus darzustellen.“⁴⁰

Mit Hilfe der Videoanalyse kann der direkte Zusammenhang zwischen der Realität in Form eines Videos und der abstrakten Darstellungsform durch Diagramme betont werden. Um diese zu verstehen ist aber ein gewisses Abstraktionsvermögen notwendig und sollte deshalb im Physikunterricht auf vielfältige Weise geübt werden. Wie im vorherigen Teil 1.4.1 bereits erwähnt, tragen auch andere Darstellungsformen wie Linien Flächen oder Vektorpfeile zur Verbesserung des Physikverständnis bei, besonders im Zusammenhang mit dynamischen Vorgängen. Hervorzuheben ist hier die Darstellung von vektoriellen Größen als Pfeile. Diese „ermöglicht auf qualitativer und quantitativer

³⁹ Vgl. Mayer und Moreno 1998, S.312ff

⁴⁰ Weidenmann 2002, S. 85

Ebene ein tieferes Verständnis mehrdimensionaler Bewegungsvorgänge.“⁴¹

Nach Mayer führt besonders die zeitliche und räumliche Kombination von Text- und Bildmaterial und die Darstellungsformen mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden zur besseren Informationsverarbeitung.⁴² In der Videoanalyse ist dies möglich, da zur Auswertung Vektorgrößen im Video eingeblendet werden oder erstellte Diagramme zeitgleich mit dem Video zu sehen sind. Sind die Vektorgrößen und Diagramme ein- und ausblendbar, können die Schülerinnen und Schüler die verschiedenen Ebenen nach und nach in ihrem Tempo erforschen, wodurch eine kognitive Überlastung vermieden werden kann. Stroboskopbilder unterstützen dies zusätzlich. Genauso verhält es sich mit Diagrammen, die sich synchron zum Ablauf des Videos aufbauen.⁴³

1.4.3 Interaktivität

Immer wieder wird hervorgehoben, dass Schülerinnen und Schüler ihre Lernprozesse selbst steuern sollen.⁴⁴ Diese Interaktivität ist bei der Videoanalyse gegeben. Wie im vorherigen Absatz bereits erwähnt, kann selbstständig der Abstraktionsgrad gewählt oder das Video angehalten und vor- bzw. zurückgespult werden. Weitere interaktive Möglichkeiten sind die manuelle Analyse des Videos oder das Anpassen von Diagrammen durch die Wahl verschiedener Achsen. Auch der Vergleich von abweichenden oder anderen Messdaten ist möglich.⁴⁵

1.4.4 Cognitive Load Theory

Die simultane Darstellung und die vielen Einstellungsmöglichkeiten können durch die verschiedenen Darstellungsformen und die Informationsdichte Lernende aber auch leicht überfordern.⁴⁶ Nach der

⁴¹ Suleder 2010, S. 30

⁴² Vgl. Mayer 2019, S. 466

⁴³ Vgl. Suleder 2010, S.30

⁴⁴ Vgl. Kultusministerkonferenz Hessen

⁴⁵ Vgl. Suleder 2010, S.30

⁴⁶ Vgl. Weidenmann 2002 S. 80

Cognitive Load Theory von Sweller⁴⁷ hat das Arbeitsgedächtnis Grenzen, die zur optimalen Nutzung nicht überschritten werden sollten. Um das zu vermeiden, müssen Informationen strukturiert werden, so dass nach der Verarbeitung genügend Ressourcen zum Lernen zu Verfügung stehen. Man kann den cognitive Load in drei Formen unterscheiden: dem extraneous cognitive load, intrinsic cognitive load und germane cognitive load.

Der extraneous cognitive load bezeichnet Belastungen, die aufgrund der Präsentation der Lerninhalte entstehen. So können ungewohnte Erscheinungen überfordernd sein, weil die neue Symbolik und der Inhalt gleichzeitig erarbeitet werden müssen.

Zu beachten ist auch der intrinsic cognitive load, der durch den Lerninhalt selbst zustande kommt, denn beim Vernetzen der Inhalte müssen viele Details gleichzeitig präsent sein. Hier gilt je komplexer der Lerninhalt, desto stärker fällt der cognitive load aus.

Der germane cognitive load nutzt die Kapazitäten, die nach dem extraneous und intrinsic loads noch frei sind zum Arbeiten. Das heißt, erst wenn durch den intrinsic und extrinsic load wenig Kapazitäten belegt sind, kann die Restkapazität von Lernenden genutzt werden, um neue Schemata zu erarbeiten und zu festigen. Ein hoher germane load ist deshalb im Gegensatz zu den anderen beiden Arten wünschenswert.⁴⁸

Um die kognitive Belastung zu senken, können folgende Ansätze genutzt werden: Vor dem Erlernen komplexer Themen sollten die dazu notwendigen Begrifflichkeiten in Schemata oder Begriffseinheiten zusammengefasst werden, da bekannte Ideen und Konzepte kognitiv leichter verarbeitet werden können. Genauso trägt auch eine leichte und klar verständliche Darstellung zur Entlastung bei. Hierzu gehört beispielsweise eine gleichbleibende Farbkodierung. Zusätzlich können gesprochene Texte (statt zum selbst Lesen) oder Textinformationen im Bild die Verarbeitung erleichtern, insbesondere wenn sonst zwischen

⁴⁷ Vgl. Sweller 1998, S. 251-292

⁴⁸ Vgl. Kircher et al. 2018 S. 471

Text und Bild zum Verständnis gewechselt werden muss. Zudem sollte auf redundante Informationen verzichtet werden.⁴⁹

1.4.5 Vorteile der Videoanalyse gegenüber anderen Messverfahren

Einer der größten Vorteile der Videoanalyse ist, dass sie im Unterschied zu anderen Messverfahren nicht invasiv ist. So müssen keine zusätzlichen Kabel und Messapparaturen in ein System integriert werden, die eine Messung nur mit „unvertretbar hohem Aufwand“⁵⁰ ermöglichen. Durch das berührungsfreie Messen wird zudem verhindert, dass der Versuch abstrakt wirkt und künstlich erscheint. Somit bleibt die Alltagsnähe erhalten. Die Videoanalyse bietet eine vergleichsweise günstige Möglichkeit, Inhalte aufzuarbeiten, da meist simples Equipment wie Smartphones zum Anfertigen des Bildmaterials ausreichen. Die intuitive Bedienung sowie breite Verfügbarkeit der Geräte kann helfen Unterrichtszeit zu sparen und problemlos Wiederholungsversuche durchzuführen. Besonders hervorzuheben ist die Möglichkeit zum Anhalten, Vor- und Zurückspulen, wodurch kritische Momente wie die Umkehr beim senkrechten Wurf einfach wiederholt und genau betrachtet und analysiert werden können.

⁴⁹ Vgl. Kircher et al. 2018 S.473

⁵⁰ Suleder 2010, S. 7

2. Physikalische Grundlagen

Die Kinematik betrachtet als Teilgebiet der Mechanik die Bewegung von Körpern im Raum. Die Bewegung wird durch Größen wie den Ort, die Zeit, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung definiert.

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Begriffe, die in dieser Arbeit verwendet werden, kurz zusammengefasst.

2.1 Die Newton'schen Axiome

Isaac Newton beschäftigte sich unter anderem damit, warum sich Körper bewegen. Dazu erforschte er die Kräfte, die Körper aufeinander ausüben. Er fand heraus, dass durch Krafteinwirkung Bewegungen von Körpern verändert werden. Diese Forschungsergebnisse werden in den drei Newton'schen Axiomen zusammengefasst: Das erste Newton'sche Axiom besagt, dass ein Körper entweder in Ruhe bleibt oder sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit fortbewegt, solange keine resultierende äußere Kraft auf ihn einwirkt. Dieses Axiom wird auch Trägheitsgesetz genannt.

Das zweite Newton'sche Axiom ist die Umkehrung des ersten Axioms. Es folgert, dass sich die Geschwindigkeit und Richtung eines Körpers verändert, wenn eine Kraft auf ihn einwirkt. Dabei ist die Beschleunigung eines Körpers proportional zu der auf ihn wirkenden Gesamtkraft, wobei die Proportionalitätskonstante der Kehrwert der Masse ist. Somit gilt:

$$a = \frac{F}{m}$$

wobei m die Masse des Körpers bezeichnet. Die resultierende äußere Kraft, die auf einen Körper einwirkt, setzt sich aus der Vektorsumme aller einwirkenden Kräfte zusammen. So gilt:

$$F_{Ges} = \sum F = m \cdot a$$

Dieses Gesetz wird auch Aktionsprinzip genannt.⁵¹

⁵¹ Tipler 2019, S. 83f, S.88

Das dritte Axiom, das Wechselwirkungsprinzip wird in dieser Arbeit nicht behandelt und ist deshalb nicht aufgeführt.

2.2 Massenpunkt

Ein Massenpunkt ist die Idealisierung eines realen Körpers. Er ist der Punkt eines Körpers oder eines Systems, in dem seine gesamte Masse vereinigt ist. Der Körper wird als mathematischer Punkt einer Masse dargestellt. Dadurch lässt sich die Bewegung eines Körpers leichter beobachten und beschreiben. Abmessung, Volumen und Form werden hier vernachlässigt. Diese Vereinfachung eignet sich in den meisten Fällen für Translationsbewegungen.⁵²

2.3 Bezugssystem

Um die Bewegung eines Körpers beschreiben zu können muss zunächst ein Bezugssystem für diese festgelegt sein.

Der Ursprung 0 dieses Bezugssystems kann beliebig gewählt werden. Alle Punkte, die ein Körper während einer Bewegung im Bezugssystem durchläuft, bilden zusammen die Bahnkurve, auch Trajektorie genannt. Zu diesem Bezugssystem gehört auch ein passendes Koordinatensystem⁵³.

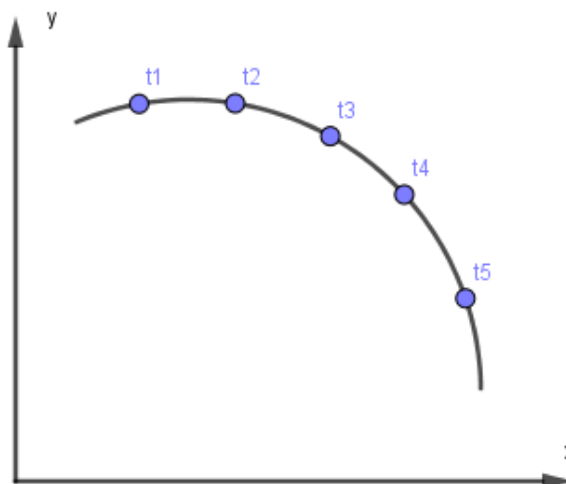


Abbildung 1 Bezugssystem mit Bahnkurve

⁵² Vgl. Roth 2022, S. 46

⁵³ Vgl. Gerthsen 2015, S. 14

2.4 Ortsvektor

Der Ort eines Massepunktes kann in diesem Koordinatensystem dann durch die Koordinaten x, y, z (im dreidimensionalen Raum) angegeben werden. Die Bewegung des Massepunktes wird durch die Abhängigkeit der Koordinaten zur Zeit angegeben:

$$r(t) = r \equiv \begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$$

r fasst dabei als Ortsvektor $r = \{x, y, z\}$ die drei Koordinaten zusammen. $r = r(t)$ ist die

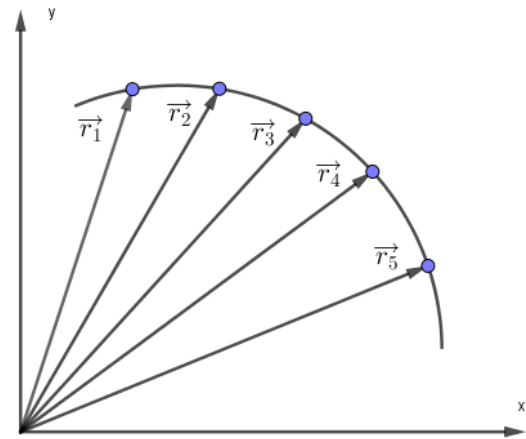


Abbildung 2 Ortsvektoren

Bahnkurve, die der Massepunkt während der Zeit seiner Bewegung vollzieht. Durch die Abhängigkeit vom Zeitparameter t spricht man von $r = r(t)$ als Parameterform⁵⁴.

2.5 Geschwindigkeit

Nach Demtröder⁵⁵ kann die Bewegung eines Massepunktes durch

$$r = v \cdot t \text{ mit } v = \{v_x, v_y, v_z\}$$

angegeben werden. Falls v konstant ist, dann vergrößert sich die Strecke proportional zur Zeit, das heißt, dass in gleichen Zeitintervallen Δt die gleiche Wegstrecke Δr zurückgelegt wird. Der Quotient aus $\frac{\Delta r}{\Delta t}$ stellt die Geschwindigkeit dar und ist ebenfalls ein Vektor. Die SI Einheit der Geschwindigkeit ist $[s] = m/s$.

Ist die Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung konstant, dann spricht man von einer gleichförmigen geradlinigen Bewegung. Im Normalfall ist v nicht konstant, sondern eine Funktion der Zeit. Um die mittlere Geschwindigkeit zu berechnen, benötigt man einen Punkt P_1 zum

⁵⁴ Vgl. Demtröder 2021, S. 43

⁵⁵ Vgl. ebd S. 44

Zeitpunkt t und einen Punkt P_2 zu einem späteren Zeitpunkt $t+\Delta t$. Aus diesen beiden Punkten lässt sich der Ortsvektor

$$\frac{\overrightarrow{P_1P_2}}{(t+\Delta t) - t} = \frac{r(t+\Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \bar{v}$$

erstellen. Wenn $\Delta t \rightarrow 0$ läuft und somit den Abstand von P_1 und P_2 immer weiter verringert, lässt sich die momentane Geschwindigkeit angeben. Sie ist der Grenzwert

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r(t+\Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} = \dot{r}$$

Die Geschwindigkeit $\dot{r}(t)$ hat in jedem Punkt der Bahnkurve $r(t)$ die Richtung der Tangente in diesen Punkten. In kartesischen Koordinaten ist ihr Betrag

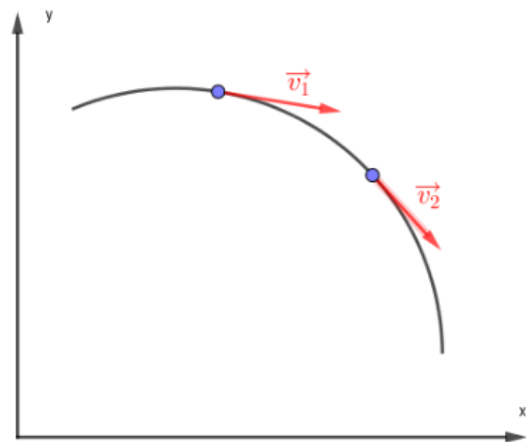


Abbildung 3 Geschwindigkeitsvektoren

$$v = |\dot{r}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \quad .^{56}$$

2.6 Beschleunigung

Eine beschleunigte Bewegung liegt dann vor, wenn die Geschwindigkeit eines Massepunktes nicht konstant ist, sondern sich im Laufe der Zeit verändert. Sie zeigt an, wie schnell sich die Geschwindigkeit des Körpers ändert. Um die momentane Beschleunigung zu bestimmen, werden wieder zwei Punkte mit ihrer momentanen Geschwindigkeit betrachtet.

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Die Momentanbeschleunigung lässt sich analog zu Herleitung der Momentangeschwindigkeit aufschreiben:

⁵⁶ Vgl. Demtröder 2021, S. 45

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

Die Beschleunigung ist also gleich der 1. zeitlichen Ableitung der Geschwindigkeit und gleich der 2. Ableitung der Weg-Zeit-Funktion. Somit ist auch a ein Vektor mit $a = \{a_x, a_y, a_z\}$. Die SI Einheit für Beschleunigung ist $[a] = 1m/s^2$.⁵⁷

2.7 Gleichförmige Kreisbewegung

Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung bewegt sich ein Körper auf einer Kreisbahn und legt in gleichbleibenden Zeiten die gleiche Wegstrecke zurück. Der Betrag v der Geschwindigkeit bleibt also gleich, während sich die Richtung fortlaufend ändert. Da $v = v \cdot \hat{e}$ immer in Richtung des Tangenteneinheitsvektors $\hat{e}_t$ der Bahnkurve zeigt. Die Strecke Δs auf dem Kreisbogen kann durch $\Delta s = R\Delta\varphi$ definiert werden. Da $R = \text{const.}$ gilt für v

$$v = \frac{ds}{dt} = R \frac{d\varphi}{dt} = R \cdot \omega$$

$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ steht für die Winkelgeschwindigkeit und wird in rad/s ausgedrückt,⁵⁸ folglich gilt für die Beschleunigung a

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(v\hat{e}_t) = \frac{dv}{dt}\hat{e}_t + v\frac{d\hat{e}_t}{dt} = v\frac{d\hat{e}_t}{dt} \text{ da } v = \text{const.}$$

und $\hat{e}_t^2 = 1$ ist die Ableitung $2\hat{e}_t \frac{d\hat{e}_t}{dt} = 0$.

Das Skalarprodukt zweier Vektoren ist null, wenn entweder einer der Vektoren ein Nullvektor ist oder beide senkrecht aufeinander stehen. Da weder $\hat{e}_t \neq 0$ noch $\frac{d\hat{e}_t}{dt} \neq 0$ müssen diese orthogonal zueinander stehen

⁵⁷ Vgl. Giancoli 2019, S. 31-32

⁵⁸ Vgl. Demtröder 2021, S. 47

also $\frac{d\hat{e}_t}{dt} \perp \hat{e}_t$. Somit ist die Beschleunigung a senkrecht zur Geschwindigkeit v . Der Vektor $\frac{d\hat{e}_t}{dt}$ gibt an, mit welcher Winkelgeschwindigkeit sich die Tangente dreht. Da $\hat{e}_t$ immer senkrecht auf dem Radiusvektor steht, müssen sich beide Vektoren mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ drehen. Daher gilt $\left| \frac{d\hat{e}_t}{dt} \right| = \omega$. Und die Beschleunigung

$$a = v \frac{d\hat{e}_t}{dt} = R \cdot \omega^2 \hat{e}_a = -R\omega^2 \hat{r}.$$

Diese Beschleunigung ist immer zum Kreismittelpunkt hingerrichtet und heißt Zentripetalbeschleunigung.⁵⁹

⁵⁹ Demtröder 2021, S.47-48

3. Verwendete Programme

Um Flugbewegungen zu erfassen und für die Analyse nutzbar zu machen sind verschiedene Anwendungen notwendig. Die Auswahl der passenden Programme hängt dabei vor allem von den eigenen Präferenzen ab. In dieser Arbeit wird zum Verfolgen der Flugzeuge flightradar24.com, zur Aufnahme das OBS-Studio und zur Analyse measure dynamics verwendet.

3.1 Flightradar24

Es gibt heutzutage verschiedenste Onlinedienste, die die Position von Flugzeugen in Echtzeit darstellen. ADS-B Exchange, AirNav, Flightradar24.com sind nur einige wenige Beispiele

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 Positionsdaten des Flugzeugs, aber auch zusätzliche Informationen wie Flugzeugtyp, Geschwindigkeit, Höhe und Außentemperatur. Diese Daten können von entsprechenden Empfängern empfangen und via Internet übertragen werden. Man spricht hier auch von Radarspotting. Die ADS-B-



Abbildung 4 Ein von Flightradar24 bereitgestellter ADS-B-Empfänger von flightradar24.com

Empfänger werden meist von den Unternehmen selbst gestellt. Mit der passenden Ausstattung kann aber jeder diese Daten empfangen und sich so dem Netzwerk anschließen. Die empfangenen Daten werden dann in das Netzwerk von Flightradar24.com eingespeist. Nach eigenen Angaben hat Flightradar24 weltweit über 20.000 ADS-B-Empfänger.⁶⁰ Dadurch sind die meisten Regionen der Welt größtenteils und Europa und USA sind sogar komplett abgedeckt. Neben ADS-B erfolgt die Positionserfassung auch über MLAT, Satellit oder Radar. Die ADS-B

⁶⁰ Vgl. flightradar24.com

Daten werden in Echtzeit 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. Neben der Webanwendung existiert zusätzlich eine App für Android und iOS. Die Basisversion der Anwendung ist kostenfrei, aber für zusätzliche Features kann ein Abo abgeschlossen werden. Für diese Hausarbeit wurde die kostenfreie Webversion genutzt.

3.2 OBS-Studio (Video-Aufnahmeprogramm)

Zum Aufnehmen von Videos gibt es viele Möglichkeiten. Das 2012 entstandene Open Broadcaster Software Studio ist eine davon. Die Software ist open source und kostenlos erhältlich. Zudem ist das OBS-Studio auf den Plattformen Windows, MacOS, Linux und FreeBSD anwendbar. Sie ist darauf spezialisiert Audio- und Videostreams live ins Internet zu übertragen. Mit dem Screen-Recorder lassen sich zudem Desktopaufnahmen erstellen. Zu den für die Videoanalyse wichtigsten Einstellungen gehören die frei wählbare Auflösung, Framerate und Formatausgabe. Die Software wird ständig weiterentwickelt und bietet neben dem Aufnehmen von Videos noch viele weitere Features. Trotz des großen Funktionsumfangs ist das OBS-Studio durch die Voreinstellung leicht zu bedienen.⁶¹

3. 3 measure dynamics

Die entstandenen Videoaufnahmen werden mit der Software measure dynamics von der Firma PHYWE analysiert. Mit der Software können Bewegungen untersucht und Ergebnisse in Diagrammen dargestellt werden.

Die Software kann mittels automatischer Objekterkennung und Objektverfolgung Videos selbstständig analysieren. Dies ist sogar mit mehreren Objekten gleichzeitig möglich. Die zu analysierenden Videos können mit dem Programm geschnitten, gedreht und komprimiert

⁶¹ Vgl. OBS-Studio

werden, da die gängigsten Videotypen unterstützt werden. Nach der Analyse kann die Software Bewegungs- (s-t), Geschwindigkeits- (v-t-) und Beschleunigungs- (a-t-) Diagramme ausgeben. Auch ein Stroboskop-Effekt für Bewegungsabläufe für eine verbesserte Visualisierung der gesamten Bewegungsbahn im Bild ist möglich. Zudem sind die erhobenen Daten und Messwerte einfach exportieren.⁶²

3.3.1 Grundlegende Funktionsweise von measure dynamics

Im Folgenden werden die wichtigsten Funktionen von measure dynamics, die in dieser Arbeit verwendet werden, erklärt. Eine genaue Anleitung zu allen Funktionen ist im Tutorial von Markus Sauer⁶³ zu finden.

Bei der Analyse von Bewegungen macht sich das Programm die Eigenschaft zunutze, dass jedes Video aus einer festgelegten Anzahl von Einzelbildern pro Sekunde aufgenommen ist. Diese fest definierten Zeitabschnitte sowie ein individuell festlegbarer Maßstab bilden die Grundlage für die Berechnungen des Analyseprogramms.

Für die Analyse ist es vorteilhaft, dass das Objekt sowohl farblich als auch in seiner Form einmalig im Videobild ist.

3.3.2 Analyse

Um mit der Analyse zu beginnen kann measure dynamics die auszuwertenden Videos in ein kompatibles Format konvertieren.

Falls das Video mit mehr als 60fps aufgenommen wurde, muss zudem die Bildrate innerhalb des Programms geändert werden, da dieses sonst das Video in einem falschen Tempo abspielt und dementsprechend falsche Zeiten in der Messung, sowie falsche Geschwindigkeiten resultieren. Die Bildrate ist auch für die richtige Auswahl der Schrittweite wichtig.

⁶² phywe.de/

⁶³ Vgl. Sauer 2013

3.3.3 measure dynamics Oberfläche

Die nebenstehende Abbildung zeigt die verschiedenen Menüpunkte von measure dynamic. Um ein Video auszuwerten, arbeitet man sich von oben nach unten durch das Menü

Unter dem Menüpunkt „Videoanalyse“ finden sich die grundlegenden Funktionen zur Skalierung und Analyse der Videos.

Unter dem Punkt „Messung“ können Längen, Winkel und mehr gemessen werden.

Der Punkt „Anzeige“ enthält die Möglichkeit, Diagramme zu erstellen, eigene Symbole einzuzeichnen oder Vektorpfeile einzufügen.

Mit „Bildkombinationen“ lassen sich Stroboskopbilder und Serienbilder erstellen.

Export überträgt die erstellten Daten beispielsweise nach MS Excel.

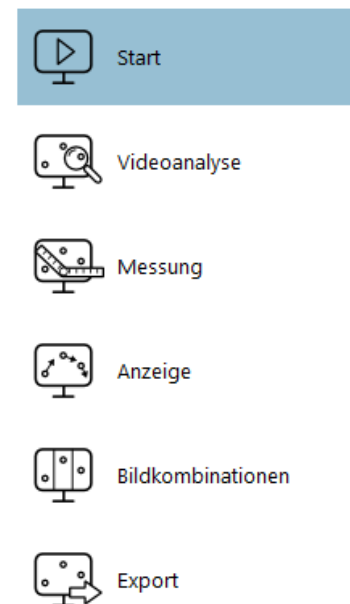


Abbildung 5 Menüpunkte

3.3.4 Eingrenzen des Videos

Zu Beginn wird der Start- und Endzeitpunkt (1) des Videos festgelegt, um den zu analysierenden Vorgang aus dem Video zu separieren. Durch diese Eingrenzung entfällt die Vor- und Nachlaufzeit. Für die Messung muss auch der Startzeitpunkt $t=0$ (2) festgelegt werden. Der neu gewählte Zeitnullpunkt sollte am besten gleich dem Startpunkt

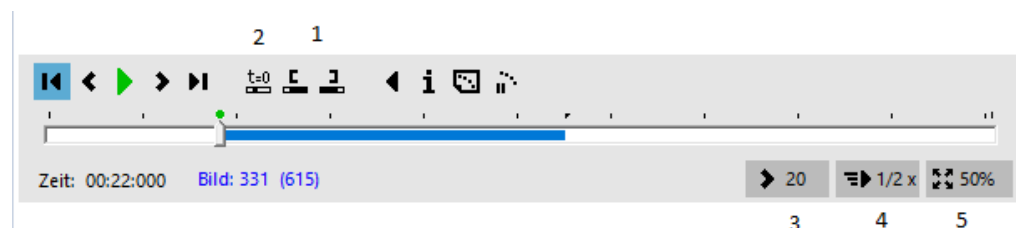


Abbildung 6 Zeitleiste

entsprechen. Neben der Zeitangabe werden ebenfalls die einzelnen Frames des Videos angezeigt, was es ermöglicht, die genauen Messwerte für jedes Bild der Aufnahme in der Tabelle wiederzufinden oder die einzelnen Frames bei der Bearbeitung durchzugehen. Mit der Schrittweite (3) wird eingestellt, welche Momentaufnahmen für die Analyse genutzt werden. Die Veränderung der Abspielgeschwindigkeit

(4) ist erst bei der Auswertung nötig. Die Zoomeinstellung (5) kann später den Bewegungsvorgang hervorheben und helfen, den Maßstab genauer festzulegen.

3.3.5 Skalierung

Damit das Programm die Messdaten sinnvoll nutzen kann, muss ein Maßstab unter „Skalierung“ festgelegt werden. Hierzu kann der Maßstab, den flightradar24.com rechts unten am Bildrand angibt, verwendet werden. Mit dieser Referenzstrecke berechnet das Programm die Abstände und Geschwindigkeiten. Dazu wird die türkise

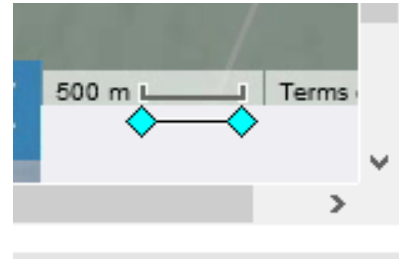


Abbildung 7 Skalierung

Strecke in der Länge und Position geändert und auf den Maßstab des Videos gelegt. Mit Hilfe der Referenzlänge erkennt measure dynamics die Anzahl der Pixel pro Längeneinheit und bestimmt damit Strecken und Abstände, um daraus Geschwindigkeiten im Video zu errechnen. Im selben Menüpunkt kann zudem das Koordinatensystem unter „Ursprung und Richtung“ geändert, gedreht oder verschoben werden. Dies ist besonders praktisch, wenn innerhalb des Videos auf die Bewegung herangezoomt und das Koordinatensystem trotzdem benötigt wird. Die Position des Koordinatensystems kann auch nach der Messung noch verändert werden. „Skalierung übernehmen“ rechnet die aus der Analyse erhaltenen Werte sofort auf die neue Skalierung beziehungsweise das Bezugssystem um.

3.3.6 Automatische und manuelle Analyse

Die Analyse kann nach einer Voruntersuchung entweder automatisch oder manuell ausgeführt werden. Dazu wird zunächst das zu beobachtende Objekt im Video markiert. Die Analyse kann durch Farb-, Muster- oder Bewegungserkennung erfolgen. Auch eine Kombination aus Farb- und Bewegungserkennung oder Muster- und Bewegungserkennung kann zur Analyse verwendet werden. Die

Kombination aus Farb- und Bewegungserkennung hat in dieser Arbeit immer zu guten Ergebnissen geführt.

Es können jedoch Probleme in Form von Verwechslung auftreten, wenn mehrere Objekte im Bild sind und so das Objekt nicht einwandfrei zu identifizieren ist. Als Folge springt der Analysepunkt dann zwischen den Objekten hin- und her. Als Hilfestellung für das Programm kann in so

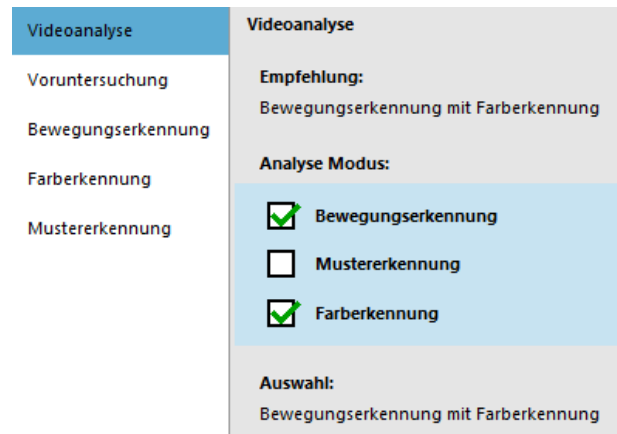


Abbildung 8 Auswahl der Analyse

einer Situation die Fläche, in der die Bewegung stattfindet, eingegrenzt werden. Während der Analyse kann man selbstständig prüfen, ob der Messpunkt noch an der richtigen Stelle ist, da das Video parallel zum

Analysevorgang abgespielt wird. Wenn die Analyse misslingt, kann als erstes die Objekterkennung geändert oder das zu verfolgende Objekt an einer anderen Stelle im Video markiert werden. Alternativ kann auch die Änderung weiterer Einstellungen wie die Messempfindlichkeit oder in der Voruntersuchung die Funktion „Objekt ist zeitweise in Ruhe“ zum Erfolg führen. Alternativ besteht die Möglichkeit der „manuellen Analyse“. Sie bietet sich aber nur in Ausnahmefällen an, da in jedem Frame das Objekt per Hand angeklickt werden muss, was sich als umständlich und sehr zeitintensiv herausgestellt hat. Allerdings können mit ihr nachträglich auch einzelne Daten der automatischen Analyse korrigiert werden, wenn beispielsweise der Messpunkt springt, in dem der entsprechende Eintrag in der Tabelle gesucht und der Messpunkt neu gesetzt wird.

3.3.7 Diagramme

Die voreingestellten Diagramme können dem Betrachter erst einmal nur t-x, t-y oder x-y anzeigen. Unter „Zusatzdiagramme“ können weitere hinzugefügt werden. Wenn man sich die (aus x und y Richtung zusammengesetzte) Geschwindigkeit oder Beschleunigung anzeigen lassen will, ist dies zunächst nicht möglich, dazu muss zuerst im

Tabellenblatt eine neue Spalte angelegt werden. In die jeweilige Spalte wird dann die entsprechende Formel beispielsweise „ $\sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ “ für die Geschwindigkeit eingesetzt. Jetzt kann die Geschwindigkeit auch als Diagramm angezeigt werden.

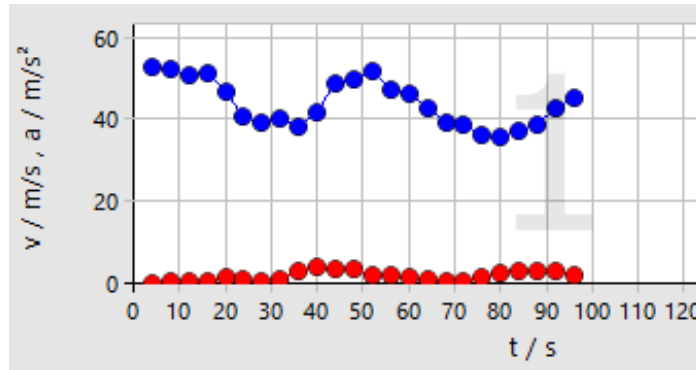


Abbildung 9 Diagramm mit $v(t)$ und $a(t)$

3.3.8 Filter

Eine weitere wichtige Visualisierungsmöglichkeit sind Filter. Sie bieten die dynamisch-ikonische Repräsentation der Daten an. Mit dieser Einstellung können Ortspunkte, Geschwindigkeits- oder Bewegungspfeile, weitere Vektoren oder Beschriftungen im laufenden Video angezeigt werden. Die Farbe, Form und Größe können auch hier wieder nach Bedarf angepasst werden. In der vorliegenden Arbeit stellen die Filter ein essenzielles Tool zur Visualisierung dar.

3.3.9 Messfehler

Wie bei jeder Messung treten auch bei der Videoanalyse Fehler auf, die die Daten ungenauer werden lassen. Bei measure dynamics hängt der Fehler mit der Skalierung für den Maßstab und dem Algorithmus zur Positionsbestimmung zusammen. Ein großer Faktor ist deshalb die Qualität der Videos. Je geringer die Auflösung, desto schwerer fällt es dem Algorithmus die genaue Position zu bestimmen. Auch ist der Punkt durch die Drehung des Objekts, in diesem Fall das Flugzeugsymbol, nicht immer auf der gleichen Position innerhalb des Objekts. Zusätzlich zu Messfehlern innerhalb der Messung kommt ein Fehler durch die Anzeige von flightradar24.com hinzu. Die dort zu sehenden Flugzeuge bewegen sich nicht gleichmäßig fort, sondern springen um einen Punkt

herum. Auch hier beträgt die Abweichung mehrere Pixel, weshalb ist der Messfehler relativ groß ausfällt.

Als Beispiel wird die Fehlerrechnung zum Abschnitt 4.4 Vektorielle Zusammensetzung der Geschwindigkeit gezeigt.

Der Maßstab in diesem Video beträgt 500m pro 41 Pixel. Folglich entspricht 1 Pixel ca. 12,19m. Dadurch kommt es schon bei der Aufnahme zu einer Abweichung von bis zu 36,58m. Zusätzlich kommt die Abweichung von 2-3 Pixeln bei der Analyse hinzu. Daher beläuft sich der kombinierte Fehler $\delta_x = \pm 73,17m$.

In Measure dynamics wird die Geschwindigkeit aus zwei Zeitpunkten berechnet $v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Daher benötigt man die Ortsänderung

$$\Delta x = x_2 - x_1 \text{ des Zeitintervalls } \Delta t = t_2 - t_1.$$

Durch die Aufnahme mit 10 fps und der Schrittweite von 20 ergibt sich für $\Delta t = \frac{20}{10}s = 2s$. Da der fps Wert ein definierter Wert ist, kann für den Zeitfehler ein Wert von $\delta_x = \pm 0,001s$ angenommen werden.

Mit den Werten lässt sich der Fortpflanzungsfehler berechnen:

$$\begin{aligned} \delta_x &= \pm \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial \Delta x}\right)^2 \cdot \delta_{\Delta x}^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial \Delta t}\right)^2 \cdot \delta_{\Delta t}^2} \\ &= \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot 2 \cdot \delta_x^2 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta t^2}\right)^2 \cdot \delta_{\Delta t}^2} \end{aligned}$$

Im besagtem Video beträgt dieser dann $\delta_x = \pm 51,74 \frac{m}{s}$

Da der Zeitmessungsfehler minimal ist und somit vernachlässigt werden

kann, kann auch vereinfacht mit $\delta_x \approx \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot 2 \cdot \delta_x^2}$ gerechnet werden. Hier wird deutlich, dass durch eine größere Schrittweite der Fehler verringert werden kann.

Es bleibt anzumerken, dass sich Δx fortlaufend ändert, und deshalb für jeden Geschwindigkeitswert eine eigene Fehlerberechnung vorgenommen werden müsste.

Eine genaue Anleitung zur Berechnung des Messfehlers findet sich im
measure dynamics Tutorial von Markus Sauer.⁶⁴

4. Anwendungsvorschläge

Dieser Teil der Arbeit zeigt Möglichkeiten auf, wie die physikalischen Grundlagen der Kinematik anhand des Frankfurt/Münchner-Konzeption und mit Hilfe von measure dynamics vermittelt werden können. Dabei soll deutlich gemacht werden, welche Möglichkeiten durch die Analyse von Flugbewegungen im Unterricht eröffnet werden, wo die Schwierigkeiten liegen und welche Grenzen das gewählte Programm bei der Analyse von Flugbewegungen hat.

4.1 Einführung der Geschwindigkeit

Die erste Anwendungsmöglichkeit zielt auf die Einführung der Begriffe Geschwindigkeit und Beschleunigung ab. Wie in der Frankfurt/Münchner-Konzeption vorgesehen, wird die Kinematik zweidimensional eingeführt. Zur Vereinfachung wird die Geschwindigkeit durch eine nachvollziehbare Konstruktion aus Pfeilen angeboten. Diese können von measure dynamics dynamisch dargestellt. Durch den phänomenologischen Einstieg über die Pfeile wird vermieden, dass die zugrundeliegende Physik durch Berechnungen überlagert wird oder sogar abschreckend wirkt. So kann sie einfacher erfasst werden. Die Ortsänderungsvektoren oder die Geschwindigkeitsvektoren können auch von den Schülerinnen und Schülern selbst zeichnerisch erstellt werden, indem sie diese bei einer vorgegebenen Bahnkurve mit Zeitmarken eintragen. Das Vorgehen ist beabsichtigt leicht nachvollziehbar, um die Grundsteine für die folgenden Unterrichtsstunden und -themen zu legen. Durch die Wiederholung des Lehrvorgangs zum Geschwindigkeitsbegriff kann das abstrakte Thema der Beschleunigung leichter zugänglich werden. Dazu wird äquivalent zu den Geschwindigkeitsvektoren über den

⁶⁴ Vgl. Sauer 2013, S. 33f

Geschwindigkeitsänderungsvektor der Beschleunigungsvektor eingeführt.

Als Einstieg in die zweidimensionale Kinematik eignet sich die Betrachtung eines beliebigen Fluges. Im besten Fall kann man ein Flugzeug auch gerade am Himmel vorbeifliegen sehen. Alternativ wird ein Video benutzt. In einer Diskussion über den Flug des Flugzeugs werden die Schülerinnen und Schüler schnell erkennen, dass sie nicht ohne weiteres sagen können, wo genau sich das Flugzeug befindet. Auch, dass sie nicht sagen können, in welche Richtung sich das Flugzeug auf der Bahnkurve bewegt hat. Dadurch kann den Schülerinnen und Schülern klar werden, dass für eine genaue Ortsangabe der Peilsender des Flugzeugs nötig ist, das heißt, dass man ein Bezugssystem benötigt. Flightradar24 kann den Peilsender des Flugzeugs erfassen und stellt ihn auf einer Karte online zur Verfügung, wo die Flugbahn, die Bahnkurve, des Flugzeugs betrachtet werden kann.

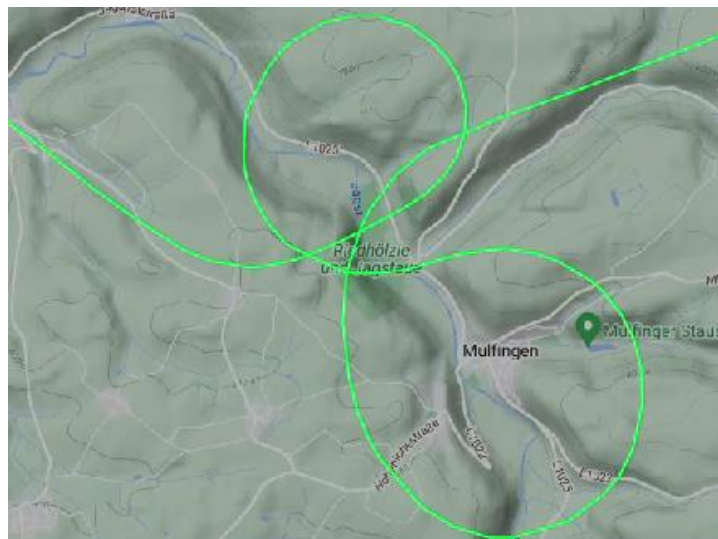


Abbildung 10 Flugkurve ohne Anhaltspunkte

Die Bahnkurve enthält aber noch keine Informationen darüber, wann sich das Flugzeug wo befunden hat. Um die Bewegung des Flugzeugs beschreiben zu können, muss der Ort zu jedem Zeitpunkt bestimmt sein. Dazu benötigt man einen Ortsvektor $\vec{r}$ der die Position des Flugzeugs zu bestimmten Intervallen anzeigt. Hierzu wird als erstes ein Koordinatensystem auf das Video gelegt und dann der Ortsvektor angezeigt. Dadurch wird deutlich, dass der Ort einen Punkt im Bezugssystem meint und der Weg die Bahnkurve beschreibt. Je mehr

Ortspunkte angezeigt werden, desto genauer lässt sich die genaue Flugbahn nachverfolgen. Jedoch wird die Videoanalyse dann

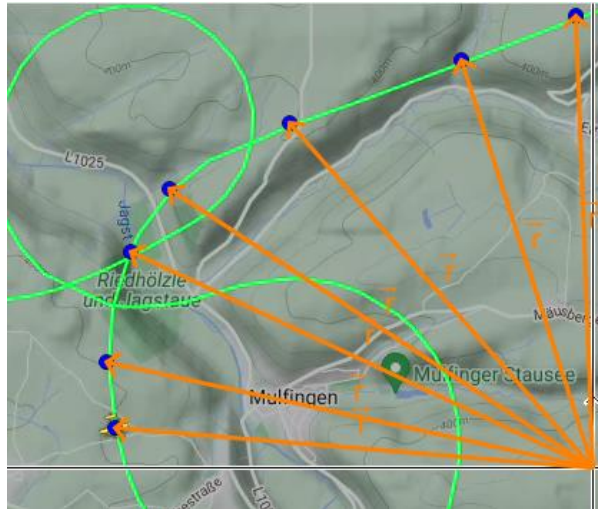


Abbildung 11 Bahnkurve mit Ortsvektoren

unübersichtlicher.

In einem nächsten Schritt kann die Änderung des Ortes innerhalb eines festen Zeitintervalls Δt angezeigt werden. Der Ortsänderungsvektor $\Delta \vec{r}$ zeigt die Bewegungsrichtung an und setzt sich aus zwei Ortsvektoren $\vec{r}_{\text{alt}}$ und $\vec{r}_{\text{neu}}$ zusammen, die den alten und neuen Ort nach dem Zeitintervall Δt angeben. Da die Schüler bereits mit der Vektoraddition aus dem Mathematikunterricht vertraut sind, können sie diese hier anwenden und somit die Verbindung $\Delta \vec{r} = \vec{r}_{\text{neu}} - \vec{r}_{\text{alt}}$ beziehungsweise $\vec{r}_{\text{neu}} = \vec{r}_{\text{alt}} + \Delta \vec{r}$ leicht herstellen. Der Ortsänderungsvektor gibt neben der Richtung der Bewegung auch das Tempo an. Hierbei sollte extra hervorgehoben

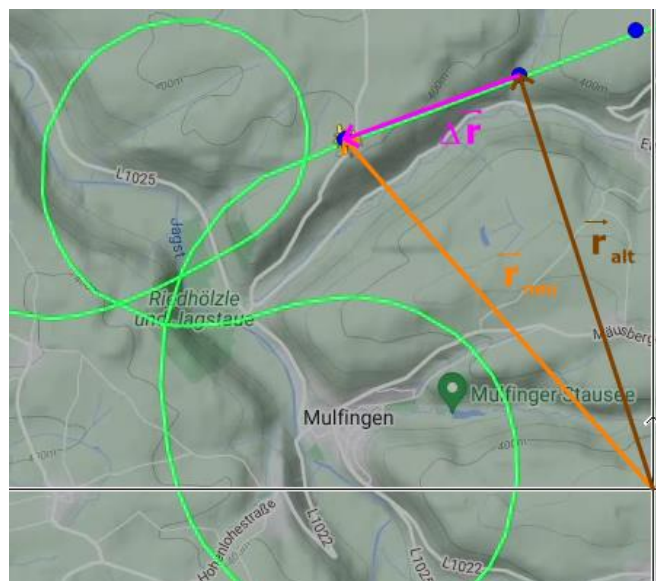


Abbildung 12 Zusammensetzung des Ortsänderungsvektors

werden, dass die Länge aber nicht nur von der Schnelligkeit, sondern auch vom Zeitintervall Δt abhängt. Um die durchschnittliche Schnelligkeit zu erhalten, dividiert man den Ortsänderungsvektor durch das Zeitintervall. Durch die Division mit Δt erhält man einen Vektor, der nun von Δt unabhängig etwas über die Änderung des Geschwindigkeitsvektors aussagt. Ausgeschrieben bedeutet das $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$. Dies ist die allgemeine Formel für die Durchschnittsgeschwindigkeit $\vec{v}$. Aufgrund dieses Zusammenhangs zeigt der Geschwindigkeitsvektor in dieselbe Richtung wie der Ortsänderungsvektor. Wenn man die Momentangeschwindigkeit erhalten will, muss das Zeitintervall Δt möglichst klein sein $\lim_{n \rightarrow 0} \Delta t$. Durch das verschwindend kleine Zeitintervall steht der Geschwindigkeitsvektor dann tangential auf der Bahnkurve.

Für dieses Beispiel wurde bewusst die Playback-Funktion von Flightradar24 genutzt, mit der sich bereits vergangene Flüge abspielen lassen. Somit ist eine genaue Bahnkurve sichtbar, die in der freien Aufnahme so sonst nur ungenau wäre, da das Flugzeug springt, siehe Kapitel 5. Eine voraufgezeichnete Datei bietet nicht die gewünschte Aktualität, aber hat für den Unterricht den Vorteil, dass die gesamte Bewegung innerhalb kurzer Zeit abgespielt werden kann. Denn auch wenn die Geschwindigkeit von Flugzeugen hoch ist, ist die Bewegung im Bezugssystem der Karte auf Grund des Maßstabs relativ langsam. In Echtzeit abgespielt hätte die im Video gezeigte Bewegung mehrere Minuten benötigt, was dazu führen kann, dass Schülerinnen und Schüler die Aufmerksamkeit verlieren. Auch kann das Video so zur Wiederholung und zum besseren Verständnis häufiger abgespielt werden, ohne zu viel Unterrichtszeit zu verlieren. Nach der ersten Begegnung können aber auch selbst eigene Flugbewegungen gesucht, aufgenommen und dann analysiert werden, um das neu Gelernte zu wiederholen.

4.2 Einführung der Beschleunigung

Nachdem die Lernenden verinnerlicht haben, wie sich der Geschwindigkeitsvektor zusammensetzt, kann dies weiter vertieft werden. Dazu werden in einem nächsten Schritt Geschwindigkeiten zu

verschiedenen Zeitpunkten verglichen. Das Augenmerk liegt hier nicht nur auf der Länge, sondern auch auf der Richtung. Bleibt das Zeitintervall konstant, ist es verständlich, dass ein kurzer Pfeil „langsam“ und ein langer Pfeil „schnell“ bedeutet. Da die Richtung für diese Tatsache unerheblich ist, wird deutlich, dass die Geschwindigkeit aus zwei

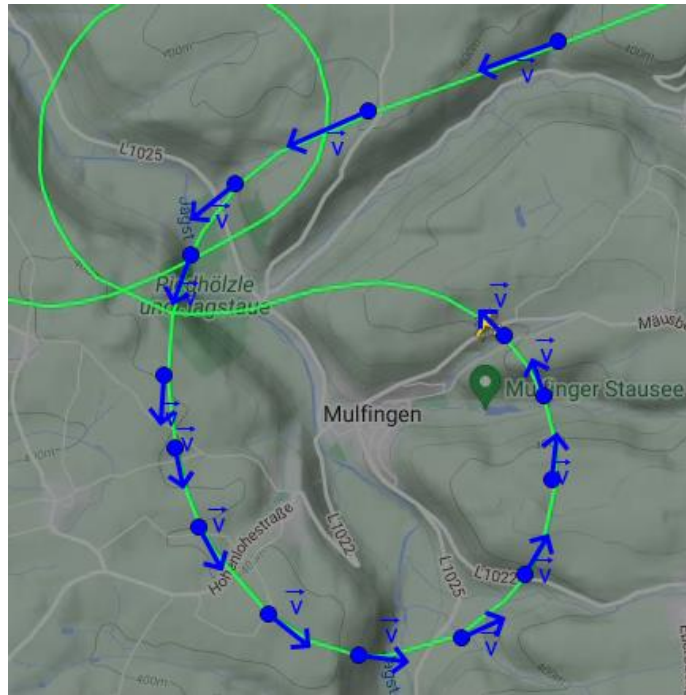


Abbildung 13 Geschwindigkeitsvektoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Komponenten besteht: der Richtung und dem Tempo.

Bei der Betrachtung der Bilder wird vermutlich die Frage aufkommen, warum der Geschwindigkeitspfeil nicht gleich dem Ortsänderungsvektor ist. Hier sollte noch einmal verdeutlicht werden, dass es sich bei den Geschwindigkeitspfeilen um die Momentangeschwindigkeit handelt. Das kann dadurch erfolgen, dass die Schrittweite verringert wird und so mehr Pfeile angezeigt werden. Allerdings sollte dann die Spurfunktion deaktiviert sein, da das Bild sonst unübersichtlich wird.

Um den Beschleunigungsvektor einzuführen, kann man das Vorgehen zum Verständnis der Geschwindigkeit wiederholen. Diesmal betrachtet man statt den neuen und alten Ortsvektoren die neuen und alten Geschwindigkeitsvektoren. Mit Hilfe von measure dynamics kann man

sich den Geschwindigkeitsvektor vor $\vec{v}_{\text{alt}}$ und nach $\vec{v}_{\text{neu}}$ im selben Ort anzeigen lassen. Der Vektor $\vec{v}_{\text{alt}}$ gibt die Geschwindigkeit zu Beginn des Zeitintervalls Δt und der Vektor $\vec{v}_{\text{neu}}$ die Geschwindigkeit nach dem gewählten Zeitintervall Δt an. Der Unterschied dieser beiden Vektoren ist

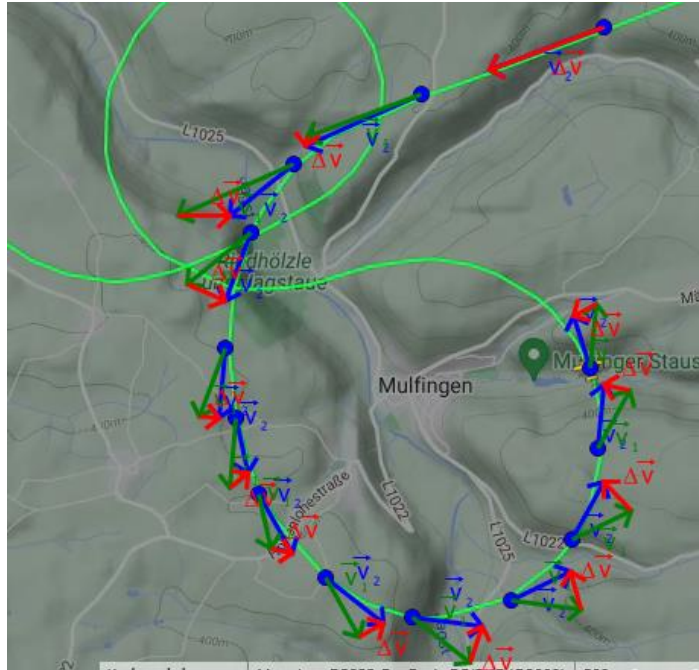


Abbildung 14 Geschwindigkeitsänderungsvektoren

die Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$.

Durch die Analogie zum Ortsänderungsvektor kann dies leichter nachvollzogen werden.

Durch die Division des Zeitintervalls Δt wird wieder dessen Einfluss ausgeschlossen. Für die Beschleunigung erhält man daher den Vektor

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Auch hier bietet measure dynamics die Möglichkeit die Beschleunigungspfeile anzuzeigen. Wie bei der Geschwindigkeit ist hier auf die Momentanbeschleunigung hinzuweisen, damit nachvollziehbar ist, warum $\vec{a}$ am Objektpunkt und nicht wie zuvor am Ende des Geschwindigkeitspfeils angesetzt wird.

Durch diese letzte Visualisierung wird noch einmal deutlich, dass sich die Richtung der Geschwindigkeit während der Flugkurve stetig ändert und die Beschleunigung immer zum Inneren der Kurve zeigt.

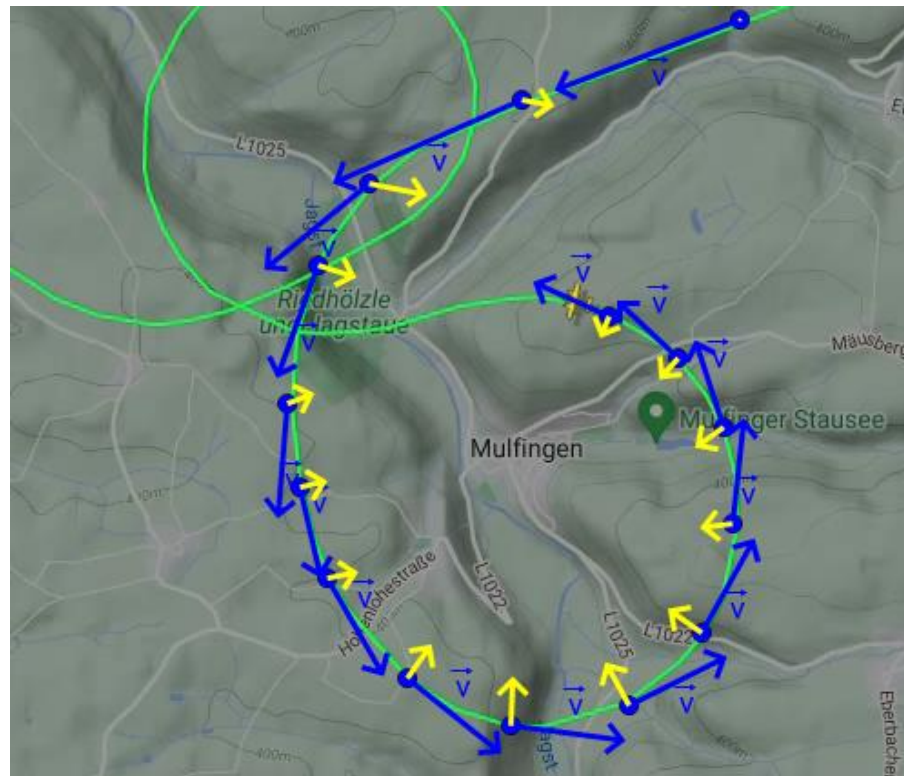


Abbildung 15 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren

Mit Hilfe dieses Einstiegs kann sichergestellt werden, dass sich die Schülerinnen und Schüler der Mehrdimensionalität der Geschwindigkeit und Beschleunigung bewusstwerden.

Die Besonderheit, dass Beschleunigung nicht nur Tempoänderung im Sinne von Schnellerwerden meint, sondern, dass darunter auch die Änderung der Richtung und somit jegliche Änderung der Geschwindigkeit fällt, kann auf diese Weise hervorgehoben werden.

4.3 Reduktion zur eindimensionalen Bewegung

Schwieriger wird es, die bereits erwähnte Vorstellung der Schülerinnen und Schüler zu korrigieren, dass negative Beschleunigung immer langsamer werden beziehungsweise positive Beschleunigung schneller werden heißt. Hierzu sind eindimensionale Bewegungen besser geeignet. Es lassen sich auch solche eindimensionalen Flugbewegungen finden: Bei Start und Landung der Flugzeuge bewegen sich diese nur in eine Richtung. Dadurch fällt die Veränderung der Richtung weg und es kann sich auf die Geschwindigkeitsänderung konzentriert werden.

Die für dieses Beispiel verwendeten Aufnahmen wurden mit einer Schrittweite von 20 analysiert. Auch hier war dies nötig, um die Schwankungen des Flugzeugs und das Springen des Messpunktes zu vermindern. Dadurch sind die Vektoren fast parallel und folglich „eindimensional“.

Bei der Betrachtung der Aufnahmen kann festgestellt werden, dass wenn die beiden Vektoren für Geschwindigkeit und Beschleunigung ($\vec{v}$ und $\vec{a}$) dieselbe Richtung haben, sich die Geschwindigkeit erhöht. Zeigen sie jedoch in entgegengesetzte Richtungen nimmt die Geschwindigkeit ab. Diese Schlussfolgerung kann durch die Betrachtung der Messwerte, vertieft werden. Haben $\vec{v}$ und $\vec{a}$ dieselben Vorzeichen dann wird die Bewegung schneller und umgekehrt nimmt die Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Vorzeichen ab.



Abbildung 16 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor bei der Landung

4.4 Vektorielle Zusammensetzung der Geschwindigkeit

Im Folgenden wird der vektorielle Charakter unter Zuhilfenahme eines „geraden“ Fluges betrachtet. Langstreckenflüge, bzw. Flüge, bei denen die maximale Flughöhe erreicht ist, sind dafür besonders gut geeignet, da sie sich über einen längeren Zeitraum hinweg in dieselbe Richtung fortbewegen.

Das mit 10fps aufgenommene Video wurde aufgrund der langsamen Bewegung mit der Schrittweite 20 analysiert. Die Geschwindigkeit und deren Richtung werden auf diese Weise gemittelt und dadurch Anzeigefehler minimiert. Resultierend haben die Ortspunkte auf diese Weise einen größeren Abstand, was die Betrachtung erleichtert.

Durch die Aktivierung des Filters Geschwindigkeit wird diese als Vektorpfeil angezeigt. Zusätzlich empfiehlt es sich den Ort als Spurpunkte darzustellen, um den Bewegungsverlauf besser nachvollziehen zu können. Als nächstes muss der Streckfaktor des Geschwindigkeitspfeils erhöht werden. In der Voreinstellung steht diese meist auf 10%, wodurch in diesem Fall der Pfeil nicht erkennbar wäre, da die Pfeilstrecke von der Pfeilspitze überlagert wurde. Für das Bild wurde eine Streckung von 500% gewählt.

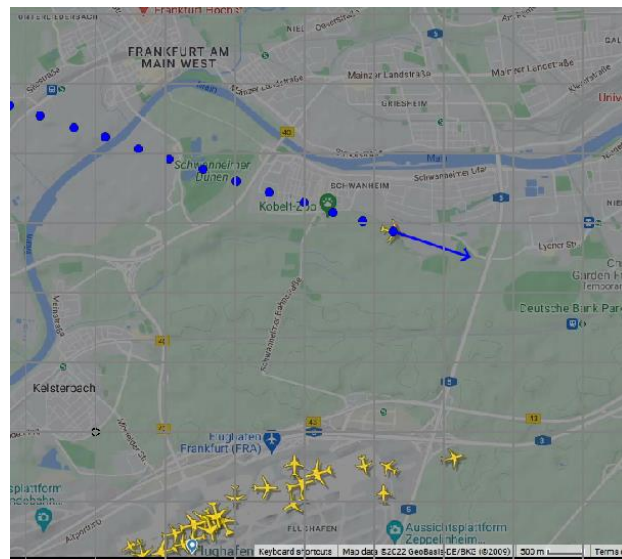


Abbildung 17 Flugrichtung und Koordinatensystem

Den Schülerinnen und Schülern sollte die Geschwindigkeitsformel $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ bzw. $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ bereits aus dem Anfangsunterricht bekannt sein. Hier ist zu erwähnen, dass sich der Geschwindigkeitsvektor aus zwei Komponenten zusammensetzt: der x- und y- Komponente. Zur Verdeutlichung kann das Koordinatensystem eingeblendet werden. Da die Lernenden bereits aus dem Mathematikunterricht mit dem Koordinatensystem vertraut sind, sollte diese Aufteilung wenig Verständnisprobleme bereiten.

Für die Anzeige des Koordinatensystems müssen vor Start der Analyse ergänzende Einstellungen vorgenommen werden, die im Kapitel 5 erläutert werden. Alternativ riskiert man, dass die Anwendung abstürzt.

Die Gitterweite muss auf den Maßstab bzw. die Skalierung angepasst werden. In den Beispielbildern betrug die Skalierung 500m pro 41 Pixel, deshalb ist eine Gitterweite von 1000 gewählt worden.

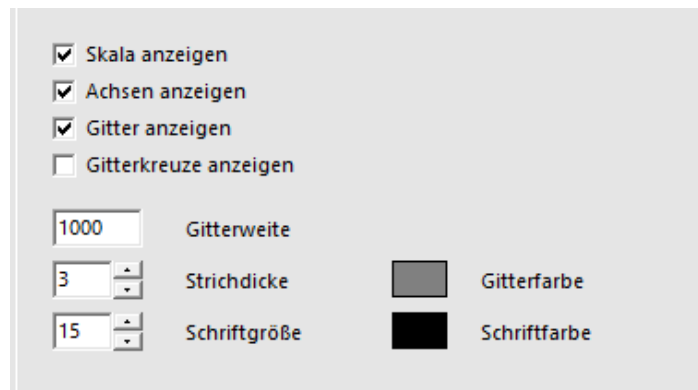


Abbildung 18 Filtereinstellung des Koordinatensystems

Aber auch die Tabellen measure dynamics können zur Verdeutlichung der x- und y-Komponente hinzugezogen werden. Sie enthalten die Spalten v_x und v_y mit den jeweiligen Daten für die Geschwindigkeit beziehungsweise a_x & a_y für die Beschleunigung. Aus der Kombination dieser Daten errechnet die Software dann den Geschwindigkeitsvektor. Die Zusammensetzung sollte spätestens durch das Anzeigen der Pfeile der x- und y- Richtung deutlich werden. Durch sie ist zu erkennen, dass eine zweidimensionale Bewegung vorliegt.



Abbildung 19 Zusammensetzung des Geschwindigkeitsvektors

Auch die Geschwindigkeit lässt sich anhand der x- und y- Richtung leicht ausrechnen. Dazu werden die entsprechenden Werte aus der Tabelle abgelesen. In diesem Beispiel betrug die Geschwindigkeit in x-Richtung $v_x=243,9 \text{ m/s}$ und in y-Richtung $v_y=-76,2 \text{ m/s}$. Mit Hilfe der Formel

$$|\vec{v}| = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2}$$

erhält man eine Geschwindigkeit von $v = 255,5 \text{ m/s} \pm 51,74 \text{ m/s}$ beziehungsweise $919,8 \text{ km/h} \pm 186,26 \text{ km/h}$. Trotz des hohen Messfehlers entspricht dies der Durchschnittsgeschwindigkeit von Linienflügen in ihrer Reishöhe. Der Messfehler kann bei einer ersten Berechnung vorerst weggelassen werden, es sollte dann aber erwähnt werden, dass die Geschwindigkeitsangabe nicht exakt ist. Auf den Messfehler und dessen Einführung wird in einem anderen Teil dieser Arbeit eingegangen.

4.5 Vom Vektor zum Diagramm

In den höheren Jahrgangsstufen ist auch das Erstellen von Diagrammen Teil des Curriculums. Häufig werden diese direkt als fertige Zeitgraphen vorgelegt, so dass es immer wieder zu Verständnisproblemen kommt. Alternativ kann auch hier zuerst mit Pfeilen gearbeitet werden, die durch geschickte Modellierung ein Diagramm darstellen können. Da einige Einstellungen in measure dynamics schwierig vorzunehmen sind, sollte diese Einheit im Plenum gemeinsam erarbeitet werden.

Das Selbsterstellen von Diagrammen ist zwar mit Flugbewegungen möglich, aber es müssen dazu einige Dinge beachtet werden, damit der Prozess gut nachvollziehbar ist.

Im Physikunterricht werden sehr häufig v-t-Diagramme genutzt. Daher bietet es sich an, ein solches auch zur Einführung zu benutzen. Dementsprechend wird eine Bewegung mit Geschwindigkeitsänderung benötigt. Allerdings darf diese Änderung nur die Geschwindigkeit und nicht die Richtung betreffen. Damit die Pfeile für Schülerinnen und Schüler leicht nachvollziehbar sind, sollte diese Bewegung möglichst

eindimensional sein. Die Bewegung muss daher auf dem Video möglichst waagrecht oder senkrecht verlaufen.

Eine solche Bewegung mit Geschwindigkeitsänderung und gleichbleibender Richtung findet man beim Start oder der Landung von Flugzeugen. Am Flughafen Frankfurt findet man zudem Start- und Landebahnen, die fast waag- bzw. senkrecht auf der Karte von flightradar24.com zu sehen sind. Gleiches gilt für die Flughäfen Stuttgart und München sowie einige kleinere Flughäfen.

Für die Aufnahme genügen wie bei den vorherigen Bewegungen 10fps und für die Analyse empfiehlt sich eine Schrittweite von 20, um genügend Messpunkte zu erhalten, bis das Flugzeug die Startbahn verlassen hat. Damit die Modellierung gelingt, wird nur die Geschwindigkeit in x- oder y-Richtung betrachtet, daher der Hinweis bei der Wahl der Startbahnausrichtung. Der Geschwindigkeitspfeil wird in diesem Beispiel nun so angepasst, dass er nur in x-Richtung zeigt. Im Filter wird dafür die y-Koordinate des Endpunkts auf den Fixwert 0 gesetzt. Zusätzlich wird die Skalierung auf 1000% erhöht. Um die Geschwindigkeitsänderung besser zu sehen, wird der Geschwindigkeitspfeil von unserem Flugzeug gelöst und an einen festen Punkt gesetzt, indem bei seinem Startpunkt die Koordinaten festgelegt werden. Noch besser zu sehen sind die Geschwindigkeiten, wenn die Spur aktiviert wird und die Pfeile untereinander angezeigt werden (siehe folgende Abbildung). Dazu muss lediglich der y-Koordinate im Startpunkt die Zeit zugeordnet werden. In der Abbildung 22 ist so schon eine Vorstufe des Diagramms zu erkennen, bei dem die Spitzen der Pfeile die Linie des Diagramms darstellen.

Damit die Pfeildarstellung wie ein übliches v-t-Diagramm aussieht, muss das Gebilde um 90° gedreht werden.

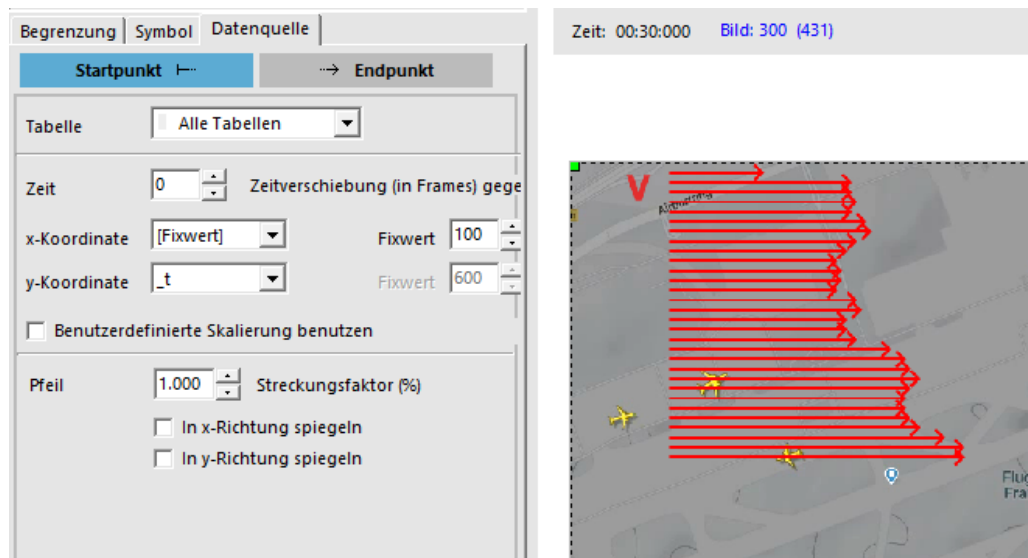


Abbildung 20 „Diagramm“ aus Geschwindigkeitspfeilen

Die folgenden Einstellungen, die dazu in measure dynamics vorgenommen werden, sind sehr umfangreich, deshalb wird die Empfehlung diese Einheit im Plenum abzuhalten an dieser Stelle noch einmal betont.

Im ersten Schritt wird einem neuen Symbolfilter ein eigenes Skript zugewiesen. Dem Startwert wird für x die Formel $50+t*70$ (Startkoordinate und ein t Wert, da das Diagramm nach rechts laufen soll) und y der Fixwert 100 gegeben. Der Endwert erhält für x

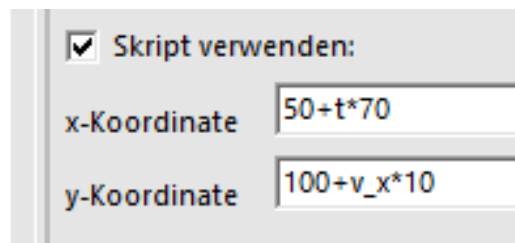


Abbildung 21 Selbsterstelltes Skript

denselben Wert, ebenso die y-Koordinate, mit einem Zusatz der Geschwindigkeit (und Streckung) $100+v_x*10$.

Um den Übergang zum Diagramm abzuschließen, wird nun noch eine Linie benötigt, die die Pfeilspitzen miteinander verbindet und zusätzlich eine Linie, die als x-Achse fungiert. Durch die zweite Linie sollen die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass es sich bei der x-Achse nun um eine Zeitachse handelt, denn bisher wurde mit den beiden Achsen nur der Ort im Video angegeben.

Dazu wird als erster neuer Filter eine Linie erstellt, die dasselbe Skript des Symbolfilters nutzt. Um die so entstandenen Punkte zu einer Linie

zu verbinden, wird zuletzt die Zeitverschiebung des Endwerts auf -10 (die genutzte Schrittweite) festgelegt. Zum Erstellen der „Zeit“-Achse wird der erste Filter geklont, allerdings wird beim Endwert die Zusatzgeschwindigkeit im y-Wert wieder entfernt.



Abbildung 22 Fertiges Diagramm aus Pfeilen und Linie

Durch Abspielen des Videos erhält man so ein sich aufbauendes Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm.

Durch den schrittweisen Ablauf kommt man nach und nach von der Pfeildarstellung zu einem Diagramm, dessen Entwicklung von den Schülerinnen und Schülern gut nachvollziehbar ist. Je nach Vertrautheit kann der Zwischenschritt des ersten ortsfesten Pfeildiagramms übersprungen werden oder zusätzlich im letzten Schritt beim Aufbau des Diagramms auch die Pfeile noch als Spur angezeigt werden.

Haben die Schülerinnen und Schüler die Herleitung verinnerlicht, kann das Ergebnis mit dem von measure dynamics automatisch erstellten Diagramm verglichen werden.

Dazu wird im Menüpunkt „Zusatzdiagramme“ ein neues Diagramm erstellt und konfiguriert. Man muss lediglich für die senkrechte Achse die Daten der Tabelle v_x auswählen.

Durch die Betrachtung der beiden Diagramme wird den Lernenden die Übereinstimmung noch einmal vor Augen geführt.

Zur Vertiefung kann die Vorgehensweise für die Beschleunigung wiederholt werden. Man kann nun die Geschwindigkeit und Beschleunigung in einem Diagramm zusammen betrachten.

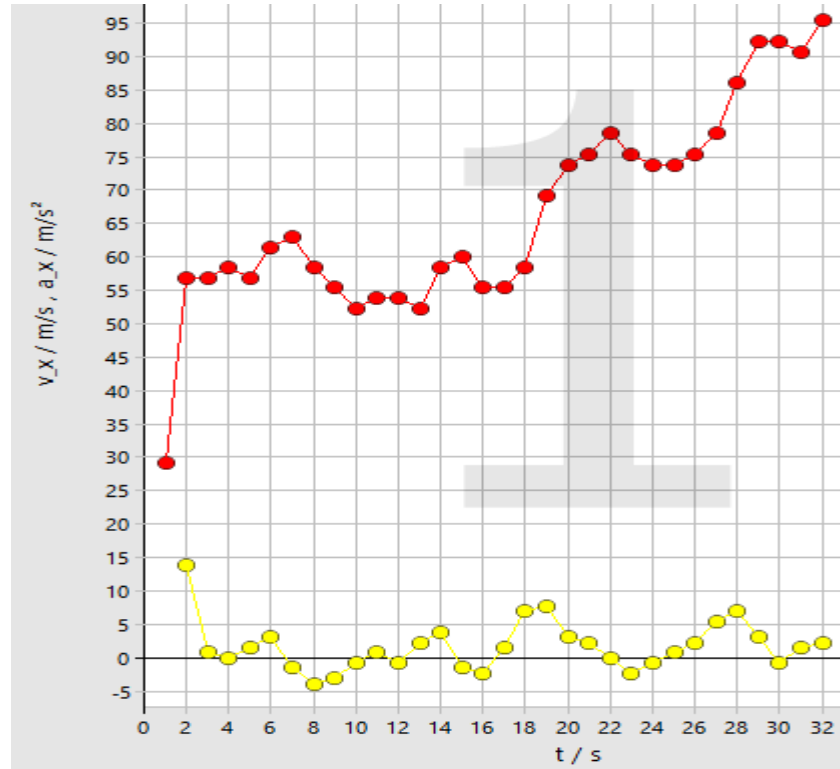


Abbildung 23 v_x und a_x in einem gemeinsamen Diagramm

Dieses Diagramm eignet sich, um den Zusammenhang von Geschwindigkeit und Beschleunigung auf eine andere Art und Weise zu visualisieren.

Als Zusatz kann bei der Diskussion des Diagramms auch darauf eingegangen werden, warum das Flugzeug zwischenzeitlich weniger schnell fliegt. Neben Einflüssen wie Gegenwind liegt das hauptsächlich an einem anderem Faktor: Die Abnahme entsteht durch die zweidimensionale Aufnahme von oben, da die dritte Dimension, die Höhe, nicht abgebildet wird. Wenn eine Beschleunigung in z-Richtung, nach oben, stattfindet und das Tempo des Flugzeugs gleichbleibt, müssen die x- und y-Komponenten des Geschwindigkeitsvektors folglich kleiner werden. So kann den Schülerinnen und Schülern bewusst gemacht werden, dass die Vektoren sich nicht nur aus zwei, sondern aus drei Komponenten zusammensetzen.

4.7 Leistung beim Start

In dem folgenden Diagramm wird die Leistung visualisiert, die während des Starts eines Flugzeuges benötigt wird.

Da die Startbahn nahezu vertikal verläuft, kann hier nur die Beträge der y-Komponente betrachtet werden, also v_y und a_y . Das Flugzeug startet in die negative Richtung, deswegen wird zur verständlicheren Darstellung des Diagramms die Richtung des Bezugssystems verändert. Dazu wird im Menüpunkt Ursprung und Richtung das Koordinatenkreuz per Rechtsklick um 180° gedreht. Ein positiver Begleitaspekt dieser Modellierung ist, dass die Wahl eines geeigneten Bezugssystems betont und wiederholt wird.

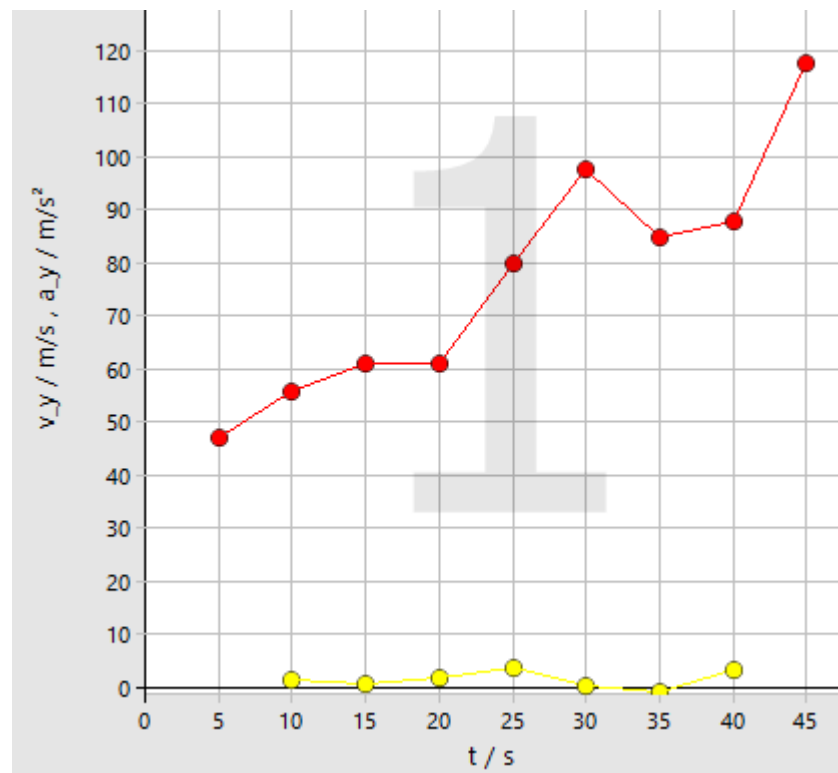


Abbildung 24 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramm

Die Leistung des Flugzeugs und die wirkende Kraft kann mit den gemessenen Werten von Geschwindigkeit und Beschleunigung berechnet werden. Für das folgende Beispiel gibt flightradar24.com den Flugzeugtyp Airbus A320 214 an, der durchschnittlich mit einem Gewicht von $m \approx 75.000\text{kg}$ angegeben wird.

Die Berechnungen werden measure dynamics durchgeführt.

Im Folgenden sind weitere Schritte angelehnt an die Anleitung von Sauer⁶⁵ verkürzt dargestellt: Die erste Spalte E_kin erhält die Einheit kJ, um die Größe der Zahlen zu limitieren. Dafür wird die Masse m in Tonnen angegeben. Als Formel wird $m=75;0,5*m*v_y*v_y$ eingetragen.

Weiter werden zwei Spalten E_kin alt und E_kin neu mit den Formeln TIME-1:E_kin und TIME+1:E_kin erstellt. Die Leistung P in MW wird in einer zusätzlichen Spalte mit der Formel $(E_{kin\text{ neu}} - E_{kin\text{ alt}}) / (2\Delta t) / 1000$ eingetragen, wobei Δt die Schrittweite 50 durch die Bildwiederholungsrate 10 ist. Die auf das Flugzeug wirkende Kraft in 0,1 MN kann durch die Formel $m=75;a_y*m/100$ berechnet werden. Die Einheit wird hier zur besseren Anschaulichkeit angepasst.

Dadurch ergibt sich folgendes Diagramm, dass sich gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern interpretieren lässt.

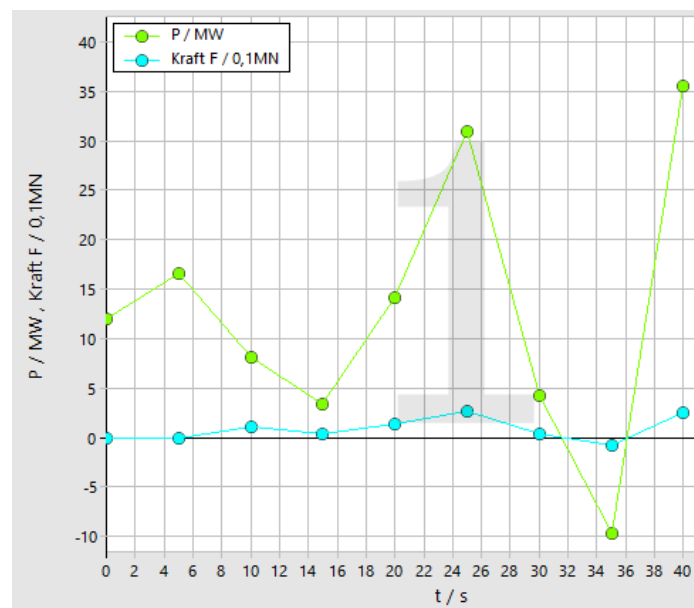


Abbildung 25 Leistung und wirkende Kraft beim Start eines Flugzeugs

Aufgrund der Messfehler und der Fehlerfortpflanzung ist eine genaue Interpretation allerdings sehr schwierig. Daher ist die Videoanalyse von Flugbewegungen kein geeignetes Hilfsmittel, um die Leistungs- und Kraftberechnung zu vermitteln.

⁶⁵ Sauer 2013, S. 87

4.7 Messfehler

Laut dem Lehrplan sollen sich die Schülerinnen und Schüler bereits in der achten Jahrgangsstufe mit der Genauigkeit von Messergebnissen befassen. Ihnen soll vermittelt werden, dass jede Messung fehlerbehaftet ist und mögliche Ursache benannt werden können. In späteren Jahrgängen erfolgt dann eine genauere Abschätzung und Bewertung von Messfehlern. Die Messunsicherheit fällt hierbei in den Kompetenzbereich der Erkenntnisgewinnung. Die Lernenden sollen in die Lage versetzt werden mögliche Fehler zu erkennen und zu reflektieren. Nur selten sind in den Physikbüchern Messfehler bei Beispielmessungen angegeben. Bei der Diskussion von erhobenen Daten muss aber immer deren Richtigkeit in Frage gestellt werden.

Daher bildet die Betrachtung von Messfehlern einen wesentlichen Bestandteil des Physikunterrichts.

Was bei der Analyse von Flugbewegungen die genaue Berechnung von Daten erschwert, bietet sich in diesem Fall hervorragend zur Diskussion von Messfehlern an: das sogenannte „Springen“ des Flugzeugs in der Aufnahme.

Um auf den Messfehler einzugehen kann ein beliebiger Flug gewählt werden. Diesmal wird eine höhere fps Einstellung von 20 gewählt.

Schon bei der Betrachtung ohne zusätzliche Filter wird deutlich, dass sich das Flugzeug nicht gleichmäßig in eine Richtung bewegt, sondern

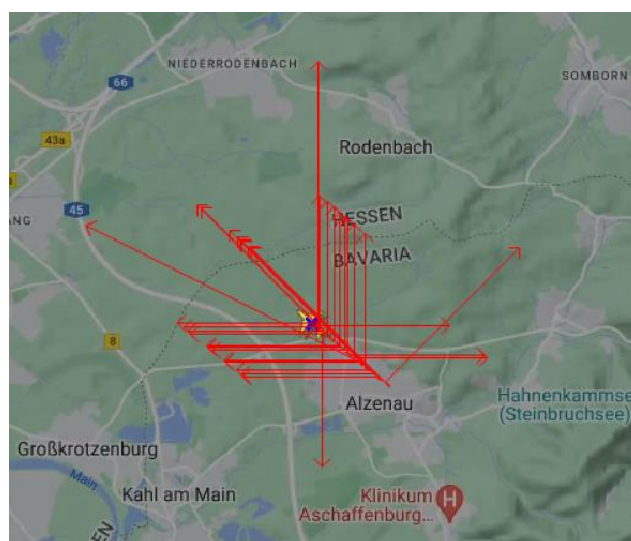


Abbildung 26 Geschwindigkeitspfeile bei niedriger Schrittweite

mal nach links, recht, nach vorne oder sogar zurück springt. Durch das Einblenden des Geschwindigkeitspfeils wird dies noch deutlicher (vgl. Abb. 28). Aus eigener Erfahrung und Beobachtungen realer Flüge, wissen die Schülerinnen und Schüler, dass sich ein Flugzeug nicht auf diese Art bewegt und hier etwas nicht stimmen kann. Hier kann man als erstes darüber diskutieren, was diesen Fehler verursacht hat. Die Ursache des Fehlers ist schnell gefunden. Er wird durch die Anzeige von Flightradar24.com erzeugt. Da dieser Fehler schon vor der eigentlichen Analyse entstanden ist und nun in die Messung mit einfließt, spricht man von einer Fehlerfortpflanzung.

Durch eine hohe Zoomstufe kann die Auswirkung von den Schülerinnen und Schülern genauer beobachtet werden. Zudem kann dadurch eingeschätzt werden, wie stark der Fehler durch das Hin- und Herspringen des Flugzeugs ist. Mit bloßem Auge kann hier ein Fehler von ungefähr einem bis zwei Pixel erkannt werden. Für die Lernenden klingt das zunächst nach wenig, aber mit einem Verweis auf die Skalierung von 41 Pixel = 1000m und somit den Unterschied in der Geschwindigkeit im Bereich von $\pm 24,4 \text{ m/s}$ bis hin zu $\pm 48,8 \text{ m/s}$ können die Schülerinnen und Schüler die Relevanz dieser Angabe gut nachvollziehen. Da sich das Flugzeug mit ungefähr 300 m/s bewegt, ist dieser Fehler somit relativ groß.

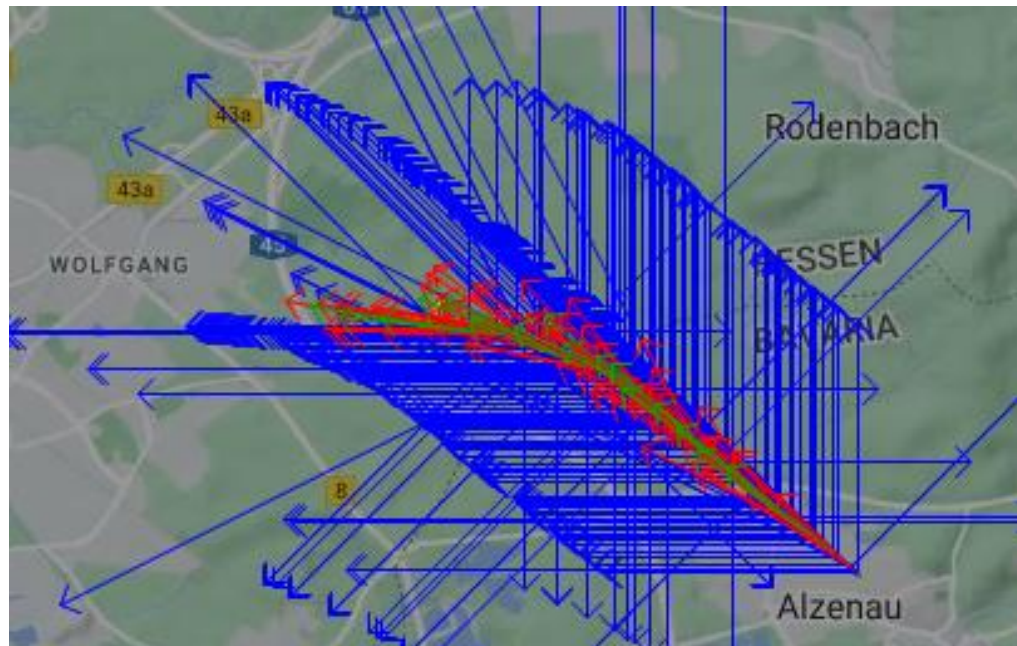


Abbildung 27 Geschwindigkeitspfeile mit unterschiedlicher Schrittweite

Im nächsten Schritt wird über die Reduzierung des Fehlers gesprochen. Durch eine größere Schrittweite in der Analyse kann das Springen des Flugzeugs „ausgeblendet“ werden. Um sich diese neuen Werte anzeigen zu lassen, muss die Analyse erneut mit erhöhter Schrittweite durchgeführt werden. Zum Vergleich empfiehlt sich eine Analyse mit Schrittweite 10 und 50, die jeweils in einem neuen Tabellenblatt abgespeichert werden. Zur Anzeige empfiehlt es sich für dieses Beispiel den Pfeilen die Tabellenfarbe zu geben. In der Abbildung 29 ist deutlich zu sehen, dass durch Vergrößern der Schrittweite die Streuung deutlich abnimmt, allerdings sollten die unterschiedlichen Schrittweiten einzeln und nacheinander betrachtet werden, um die Schülerinnen und Schüler nicht zu überfordern.

In höheren Klassen kann an diesem Punkt auch eine Fehlerberechnung durchgeführt werden. Wie im Teil „Messfehler“ lautet die Formel für den Fortpflanzungsfehler

$$\delta_x = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial \Delta x}\right)^2 \cdot \delta_{\Delta x}^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial \Delta t}\right)^2 \cdot \delta_{\Delta t}^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot 2 \cdot \delta_x^2 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta t^2}\right)^2 \cdot \delta_{\Delta t}^2}$$

bzw. vereinfacht

$$\delta_x \approx \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot 2 \cdot \delta_x^2}$$

Dadurch erhält man an der Zeitmarke 50 für die Schrittweite $n = 1$ einen Fehler von $\pm 689,85 \text{ m/s}$, für $n = 10$ beträgt die Abweichung nur noch $\pm 69,83 \text{ m/s}$ und für $n = 50$ nur noch $\pm 13,79 \text{ m/s}$.

Auf diese Art und Weise kann den Schülerinnen und Schülern sehr gut deutlich gemacht werden, dass Messfehler überall versteckt sind und wie sie Messungen beeinflussen. Zudem kann durch dieses Vorgehen auch dargestellt werden, wie der Messfehler durch Mittelung verringert werden kann. Allerdings sollte die Lehrkraft darauf hinweisen, dass dadurch die Messung insgesamt ungenauer wird.

4.8 Winkelgeschwindigkeit und Zentripetalbeschleunigung

Besonders die Zentripetalbeschleunigung bei der Kreisbewegung bereitet den Schülerinnen und Schülern Schwierigkeiten. Statt einer abstrakten rein rechnerischen Herangehensweise, lässt sich dieses Konzept auch graphisch und mit wenigen einfachen elementaren Umformungen veranschaulichen. Dies wird im Folgenden ausgeführt. Als Ausgangspunkt dient hierzu ein kreisförmiger Flug. Ein perfekt geflogenen Kreis ist zwar fast unmöglich zu finden, aber häufig fliegen Flugzeuge vor dem Landeanflug einen Halbkreis. Zur Veranschaulichung und als Alltagsbeispiel kann dies ausnahmsweise aber benutzt werden. Für diese Analyse ist eine Schrittweite von 50 völlig ausreichen. Als nächstes wird der Filter des Geschwindigkeitspfeils angepasst. Die Spur

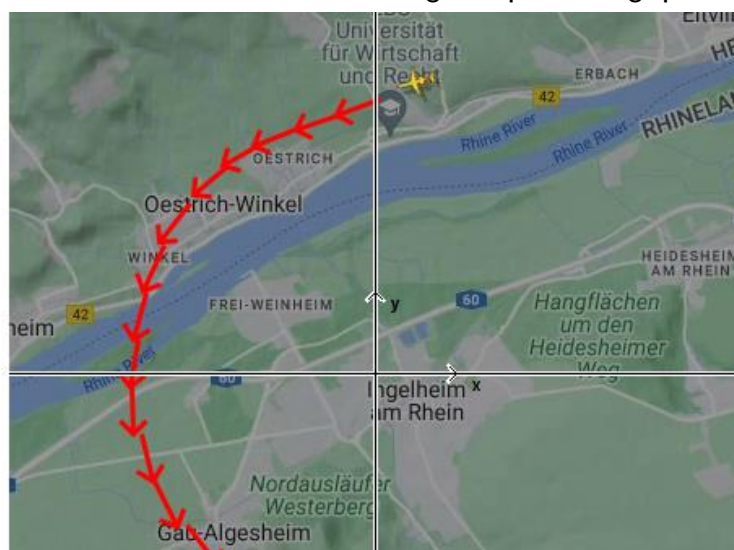


Abbildung 28 Festlegen eines neuen Ursprungs

wird aktiviert und zur besseren Anschaulichkeit der Streckfaktor auf 500% eingestellt. Die nächste Einstellung ist etwas schwieriger und auch ein Grund, warum diese Herangehensweise mit Hilfe von flightradar24 zwar möglich, aber nur bedingt empfehlenswert ist: Der Ursprung des Koordinatensystems muss auf den Mittelpunkt der Flugkurve gelegt werden. Diese Einstellung wird im Menüpunkt „Messung“ -> „Ursprung und Richtung“ vorgenommen.

Nachdem der Ursprung verschoben und die Skalierung erneuert wurde wird ein weiterer Filter benötigt.

Die Ortsänderung dient in diesem Fall dazu den Ortsvektor zu mehreren Zeitpunkten anzuzeigen. Mit dieser Vorbereitung kann nun als erstes auf die Winkelgeschwindigkeit eingegangen werden.

Wenn das Flugzeug im (Halb-)Kreis fliegt, dann wird der Winkel, der vom Ortsvektor überstrichen wird, proportional zur Zeit größer. Aus dem Winkel und der Zeit setzt sich so die Winkelgeschwindigkeit zusammen.

$$\omega = \frac{\text{überstrichener Winkel}}{\text{benötigte Zeit}}$$

Durch die Messwerkzeuge in measure dynamics lassen sich Winkel sehr einfach messen. Dadurch können die Schülerinnen und Schüler spielerisch die Winkelgeschwindigkeit berechnen.

Durch die Messung ergab sich ein Winkel von $\approx 11,45^\circ$. Das Zeitintervall der Schritte betrug 10 Sekunden, woraus sich eine Winkelgeschwindigkeit von $1,145 \text{ rad/s}$ ergibt.

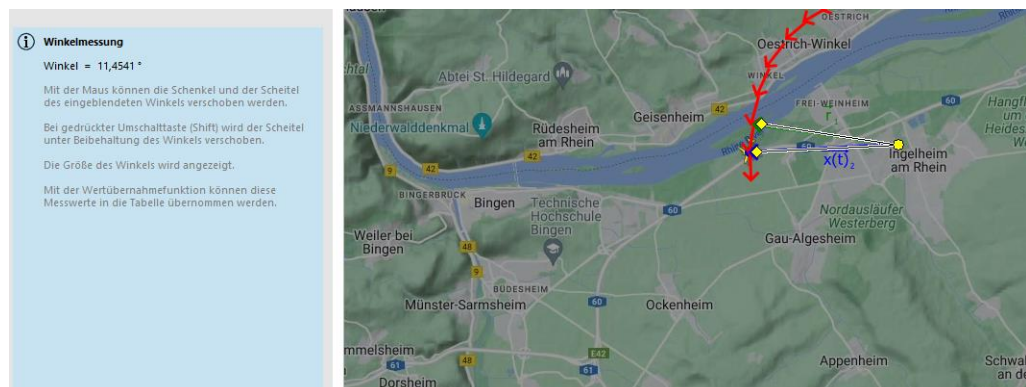


Abbildung 29 Messung des Winkels der Ortsänderungsvektoren

Um den Begriff Zentripetalbeschleunigung zu erfassen sind noch einige zusätzliche Schritte notwendig.

Dass die Geschwindigkeit tangential zur Flugkurve und in unserem Fall die Kreiskurve ist, ist den Schülerinnen und Schülern durch die vorherigen Untersuchungen bereits bekannt und auch hier wieder gut zu erkennen. Auch wissen die Lernenden bereits, dass $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ ist. Die Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ kann durch einen Filter betrachtet werden. In der Filterkonfiguration muss dazu dem Zeitschritt den gleichen Wert wie die Schrittweite gegeben werden und nach Bedarf der Streckfaktor erhöht werden. Mit Hilfe der Winkelmessung können die Schülerinnen und Schüler überprüfen, dass der Winkel zwischen $\vec{v}(t)$ und $\vec{v}(t+\Delta t)$ und $\vec{x}(t)$ und $\vec{x}(t+\Delta t)$ der gleiche ist, nämlich $\omega \Delta t$. In einer Kreisbewegung würde der Vektor $\Delta \vec{v}$ für sehr kleine Δt nun orthogonal zu $\vec{v}(t)$ stehen. Die Beschleunigung zeigt also auf den Kreismittelpunkt. In dem Fall hier ist das nicht komplett der Fall, da das Flugzeug weder einen perfekten Kreis fliegt noch seine Schnelligkeit beibehält. Trotzdem ist auch hier zu erkennen, dass die beiden Vektoren „parallel“ sein sollen. Da der Winkel $\omega \Delta t$ als sehr klein angenommen wird, wird auch $\Delta \vec{v}$ sehr klein bzw. kurz. Er kann dementsprechend auch als kleiner Kreisbogen angesehen werden. Hier ist von Seiten der Lehrkraft eine gute Begründung notwendig, damit die Schülerinnen und Schüler dies akzeptieren. Als nächstes müssen die Lernenden ein bisschen Formeln umstellen. Ihnen sollte die Formel für den Winkel im Bogenmaß bekannt sein. Sie ist die Länge des Kreisbogens dividiert durch den Radius des Kreises. In unserem Fall bedeutet das

$\omega \Delta t = \frac{\Delta \vec{v}}{v}$ durch Umformen erhält man $\omega \vec{v} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$. Der rechte Term dürfte den Schülerinnen und Schülern nun wieder bekannt vorkommen. Er ist die Beschleunigung $\vec{a}$.

Nun kann festgehalten werden, dass bei der gleichmäßigen Kreisbewegung die Beschleunigung vom Objekt in unserem Fall das Flugzeug zum Zentrum der Bewegung hinzeigt und $a = \omega v$ ist.

Diese Beschleunigung ist die Zentripetalbeschleunigung.

Wenn man den Pfeil der Beschleunigung anzeigt, ist dieser allerdings nicht immer senkrecht zur Geschwindigkeit zum Kurvenmittelpunkt gerichtet. Als Ursache ist hier zum einen die nicht gleichbleibende Geschwindigkeit, als auch die nicht perfekte Kreisbewegung anzuführen.



Abbildung 30 Geschwindigkeitsänderungsvektor und Beschleunigung

Durch diese Herangehensweise kann den Lernenden die Zentripetalbeschleunigung und ihre Formel erklärt werden. Da einige Umformungsschritte notwendig und das Thema komplexer als die vorherigen ist, sollte dies erst in höheren Klassenstufen ausprobiert werden.

Man erkennt aber deutlich, dass Erklärungen durch Flugbewegungen hier an ihre Grenzen kommen, da es nicht möglich ist Flugzeuge zu finden, die gleichmäßige Kreise mit gleichbleibender Geschwindigkeit fliegen. Daher ist anzumerken, dass sich andere Bewegungen für diese Anwendung besser eignen können.

5. Allgemeine Hinweise und Probleme bei der Durchführung

Für eine reibungslose Nutzung der Videoanalyse sind gewisse Punkte zu beachten.

Da lang andauernde vermeintlich „langsame“ Bewegungen analysiert werden, sollte das Video eine möglichst niedrige Bildwiederholungsrate haben. Zum einen wird dadurch die Dateigröße des Videos kleiner und lässt sich schneller konvertieren und zum anderen ist eine niedrige Bildwiederholungszahl für die hier genutzten Anwendungen ausreichend. Das Hauptproblem bei der Analyse der Flugbewegungen ist aber das Springen des Flugzeugs auf der Webseite von flightradar24.com und die damit verbundene Streuung der Messpunkte. Da measure dynamics nur den Ort bestimmt, um daraus die Geschwindigkeit und folgend die Beschleunigung zu berechnen, kann es hier zu erheblichen Verzerrungen kommen. So kann es vorkommen, dass der Geschwindigkeitspfeil in die entgegengesetzte Flugrichtung zeigt. Noch stärker fällt dies bei der Beschleunigung auf, da sie stetig in alle möglichen Richtungen zeigt. Das Problem kann durch das Einstellen einer größeren Schrittweite vor der Analyse behoben werden. Durch einen größeren Abstand der Messzeitpunkte fallen die Schwankungen des Messpunkts weniger ins Gewicht.

Erschwert wird das Arbeiten mit measure dynamics zusätzlich, da in einer unbenutzten measure dynamics Version nur die Standardfilter nutzbar sind. Zusätzliche Filter müssen vor der Benutzung erst aus anderen fremden Projekten geladen werden.

Anzumerken bleibt, dass bei der Manipulation von Pfeilen immer darauf zu achten ist den Start- und Endwert zu ändern, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Wird die Änderung nur bei einem der beiden vorgenommen, kann es leicht zu falschen Anzeigen kommen.

Ein besonderes Problem, dass während des Erstellens der Arbeit aufgetreten ist, ist das Einblenden eines Gitters über dem Video. Wird der Gitterfilter für ein bereits analysiertes Video aktiviert, friert die Bedienoberfläche ein und die Anwendung reagiert nicht mehr. Das hängt mit der selbsteingestellten Skalierung zusammen: Wird auf eine Skalierung von 500m pro 40 Pixel die voreingestellte Gitterweite von 1m

gelegt, scheitert das Programm bei der Umsetzung und „hängt sich auf“. Alle nicht gespeicherten Änderungen und Projekte gehen somit verloren. Was zu großer Frustration und erheblichen Zeitaufwand durch die Neuerstellung führt.

6. Fazit

Mit der Videoanalyse ist es möglich, einen phänomenologischen Einstieg in die Kinematik zu gestalten, denn durch die Anzeige der Flugdaten auf einer Karte ist eine zweidimensionale Bewegung von Schülerinnen und Schülern nachvollziehbar. So können durch die Möglichkeiten von measure dynamics die Konzepte von Ort, Tempo, Geschwindigkeit Beschleunigung, Bahngeschwindigkeit und Zentripetalkraft vermittelt werden. Weil die, von flightradar24.com in Echtzeit übertragenen Flugdaten von den Lernenden aufgenommen werden können, ist eine eigenständige Übung und Vertiefung möglich. Die Videoanalyse von Flugbewegungen bietet zudem Anknüpfungspunkte für weiterführende Unterrichtsinhalte: durch die Fortbewegung in der Luft kann eine Überleitung zum dynamischen Auftrieb stattfinden und auf die Dreidimensionalität von Vektoren verwiesen werden. Trotzdem kann die Bewegung auch auf eine Dimension reduziert werden und so die eindimensionale Bewegung als Spezialfall abgehandelt werden

Die Streuung der Messpunkte durch die Anzeige von flightradar24.com macht genaue Messungen allerdings unmöglich. Hier muss durch die benötigte größere Schrittweite immer mit einem Durchschnittswert gearbeitet werden. Aus diesem Grund eignet sie die Videoanalyse von Flugbewegungen aber dazu auf Messfehler einzugehen, denn diese sind hier deutlich zu erkennen und die Auswirkungen nachvollziehbar.

Trotz allen genannten Vorteilen bietet die Videoanalyse von Flugbewegungen nicht alle vom Curriculum geforderten Bewegungen an. So müssen die gleichmäßige Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie Kreisbewegung mit separaten Experimenten dargestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich die Videoanalyse von Flugbewegungen in bestimmten Fällen zur Vermittlung von Wissen zur Kinematik und Dynamik eignet.

7. Literaturverzeichnis

Baumert, J., Bos, W. & Lehmann, R. (2000). TIMMS / III Dritte Internationale Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie. Mathematische und naturwissenschaftliche Bildung am Ende der Schullaufbahn. Mathematische und physikalische Kompetenzen am Ende der gymnasialen Oberstufe (Band 2). Opladen: Leske + Budrich.

Burde, J.-P., Ivanjek, L., Wilhelm, T., Schubatzky, T., Haagen-Schützenhöfer, C. Dopatka, L., Spatz, V., Hopf, M. (2021) Schülervorstellungen in Schule und Studium – ein Vergleich. Habig, S., v. Vorst, H. (Hrsg.): Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, online Jahrestagung 2021, Band 42, 2022, S. 372 – 375
https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2022/TB2022_372_Burde.pdf

Demtröder W. (2021). Experimentalphysik 1 : Mechanik und Wärme. In Springer-Lehrbuch. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62728-0>

Duit, R. (1993). Schülervorstellungen – von Lerndefiziten zu neuen Unterrichtsansätzen. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 4 (16), 4-10.

Flightradar24.com. how flight tracking works. Online verfügbar unter <https://www.flightradar24.com/how-it-works>, abgerufen am 15.11.2022

Giancoli, D. C. (2019). Physik. In Pearson Studium - Physik. Hallbergmoos: Pearson.

Hessisches Kultusministerium. Lehrpläne im Fach Physik. Online verfügbar unter <https://kultusministerium.hessen.de/sites/kultusministerium.hessen.de/files/2021-06/lphauptphysik.pdf>,
<https://kultusministerium.hessen.de/sites/kultusministerium.hessen.de/files/2021-06/lprealphysik.pdf>,

<https://kultusministerium.hessen.de/sites/kultusministerium.hessen.de/files/2021-06/g9-physik.pdf> abgerufen am 12.11.2022.

Jung, W., Reul, H., & Schwedes, H. (1977). Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3–6. Frankfurt a. M.: Verlag Moritz Diesterweg.

Kircher, E., Girwidz, R., & Fischer, H. E. (2020). Physikdidaktik Grundlagen / Ernst Kircher, Raimund Girwidz, Hans E. Fischer (Hrsg.). In E. Kircher, R. Girwidz, & H. E. Fischer (Hrsg. & Übers), Lehrbuch. Berlin: Springer Spektrum.

Krüger D., Parchmann, I., & Schecker, H. (2018). Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung (Krüger D., I. Parchmann, & H. Schecker, Hrsg. & Übers). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56320-5>

Meschede, D. (2015). Gerthsen Physik. In Springer-Lehrbuch.

Mayer, R. E., & Moreno, R. (1998). A split-attention effect in multimedia learning: Evidence for dual processing systems in working memory. *Journal of Educational Psychology*, 90(2), 312–320

Mayer, R. E. (2019). How multimedia can improve learning and instruction. In J. Dunlosky & K. A. Rawson (Eds.), *The Cambridge handbook of cognition and education* (pp. 460–479). Cambridge University Press.

Mikelskis, H. F. (2006). Physik-Didaktik : Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II (H. F. Mikelskis, Hrsg. & Übers.). Berlin: Cornelsen Scriptor.

OBS Studio. Online verfügbar unter <https://obsproject.com/de>, abgerufen am 10.10.2022

Roth, S., & Stahl, A. (2022). Mechanik : Experimentalphysik – anschaulich erklärt (A.

Stahl, Übers.). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-64365-5>

Sauer, M. (2013). Ein Tutorial zu measure dynamics. Online verfügbar unter <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Tutorial.pdf>, abgerufen am 01.11.2022

Sauer, M. (2013) Ein Tutorial zu measure dynamics. Online verfügbar unter <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Tutorial.pdf> Abgerufen am 10.11.2022.

Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M., & Duit, R. (2018).

Schülervorstellungen und Physikunterricht : Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis (H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, & R. Duit, Hrsg. & Übers).

Suleder, M. (2010). Videoanalyse und Physikunterricht : Technik - Didaktik - Unterrichtspraxis. In Unterrichtshilfen Naturwissenschaften. Freising [i.e. Hallbergmoos]: Aulis-Verl.

Sweller, J.; Van Merriënboer, J.J.G.; Paas, F.G.W.C. (1998): Cognitive Architecture and Instructional Design – In: Educational Psychology Review, Vol.10, Nr.3, Springer Science+Business Media B.V., S. 251-292

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2019). Physik : für Studierende der Naturwissenschaften und Technik (P. Kersten & J. Wagner, Hrsg.; G. Mosca, P. Kersten, & J. Wagner,

Weidenmann, B. (2002). Multicodierung und Multimodalität im Lernprozess. In: Issing, L. & Klimsa, P. (Hrsg.). Information und Lernen mit Multimedia. Weinheim: Beltz PVU, 45–62 Übers.).

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58281-7>

Waltner, C; Tobias, V.; Wiesner, H.; Hopf, M.; Wilhelm, T. (2010) Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe. Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 7, S. 9 - 22

Weidenmann, B. (2002). Multicodierung und Multimodalität im Lernprozess. In: Issing, L. & Klimsa, P. (Hrsg.). Information und Lernen mit Multimedia. Weinheim: Beltz PVU, 45–62.

Wilhelm, T.; Heuer, D. (2002). Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden - durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung. Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 51, Nr. 7, S. 29 - 34

Wilhelm, T. (2005). Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung. Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Logos-Verlag, Berlin, 2005

Wilhelm, T. (2008). Mechanik - zweidimensional und multicodal. Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin, Lehmanns Media

Wilhelm, T., Schecker, H., & Hopf, M. (2021). Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis (T. Wilhelm, H. Schecker, & M. Hopf, Hrsg. & Übers).

Wiesner, H. (1992). Unterrichtsversuche zur Einführung in die Newtonsche Mechanik. In H. Wiesner (Hrsg.), Verbesserung des Lernerfolgs durch Untersuchungen von Lernschwierigkeiten im Physikunterricht (S. 261–272). Habilitationsschrift, Universität Frankfurt am Main.

Wolf, A. (2012). Zusammenhänge zwischen der Eigenständigkeit im Physikunterricht, der Motivation, den Grundbedürfnissen und dem Lernerfolg von Schülern. In: Niedderer, H., Fischler, H., Sumfleth, E. (Hrsg.): Studien zum Physik und Chemielernen, Band 131. Berlin: Logos Verlag

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Bezugssystem mit Bahnkurve.....	17
Abbildung 2 Ortsvektoren	18
Abbildung 3 Geschwindigkeitsvektoren	19
Abbildung 4 Ein von Flightradar24 bereitgestellter ADS-B-Empfänger von flightradar24.com	22
Abbildung 5 Menüpunkte.....	25
Abbildung 6 Zeitleiste.....	25
Abbildung 7 Skalierung.....	26
Abbildung 8 Auswahl der Analyse.....	27
Abbildung 9 Diagramm mit $v(t)$ und $a(t)$	28
Abbildung 10 Flugkurve ohne Anhaltspunkte.....	31
Abbildung 11 Bahnkurve mit Ortsvektoren.....	32
Abbildung 12 Zusammensetzung des Ortsänderungsvektors	32
Abbildung 13 Geschwindigkeitsvektoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten	34
Abbildung 14 Geschwindigkeitsänderungsvektoren.....	35
Abbildung 15 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren	36
Abbildung 16 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor bei der Landung	37
Abbildung 17 Flugrichtung und Koordinatensystem.....	38
Abbildung 18 Filtereinstellung des Koordinatensystems	39
Abbildung 19 Zusammensetzung des Geschwindigkeitsvektors	39
Abbildung 20 „Diagramm“ aus Geschwindigkeitspfeilen	42
Abbildung 21 Selbsterstelltes Skript	42
Abbildung 22 Fertiges Diagramm aus Pfeilen und Linie	43
Abbildung 23 v_x und a_x in einem gemeinsamen Diagramm.....	44
Abbildung 24 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramm	45
Abbildung 25 Leistung und wirkende Kraft beim Start eines Flugzeugs.....	46
Abbildung 26 Geschwindigkeitspfeile bei niedriger Schrittweite	47
Abbildung 27 Geschwindigkeitspfeile mit unterschiedlicher Schrittweite.....	49
Abbildung 28 Festlegen eines neuen Ursprungs.....	50
Abbildung 29 Messung des Winkels der Ortsänderungsvektoren.....	51
Abbildung 30 Geschwindigkeitsänderungsvektor und Beschleunigung	53

9. Anhang

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt durch meine eigene Unterschrift, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen genommen sind, als solche kenntlich gemacht habe. Die Versicherung bezieht sich auch auf in der Arbeit gelieferte Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen und dergleichen.

Datum:

Unterschrift: