

Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung
für das Lehramt an Gymnasien im Fach Physik,
eingereicht der Hessischen Lehrkräfteakademie
– Prüfungsstelle Frankfurt –

Thema: Bewegungsaufnahmen mit GPS im Physikunterricht

Verfasser: Patrick Zeder

Gutachter: Prof. Dr. Thomas Wilhelm

Danksagung

In erster Linie bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Thomas Wilhelm für die Betreuung bei der Erstellung dieser Arbeit, seine ständige Bereitschaft zu Gesprächen und die konstruktiven Hinweise.

Ebenfalls möchte ich mich bei Louisa Lohse bedanken für ihren Rat bei auftretenden Problemen und ihre Hinweise auf orthografische oder grammatikalische Fehler.

Abschließend gilt mein Dank meinen Eltern für die Unterstützung während meines Studiums und vor allem meinem jüngeren Bruder Yannick, der für mich zahlreiche Sprints absolvierte, die ich mit dem Smartphone aufnehmen konnte, um sie anschließend in dieser Arbeit beispielhaft zu analysieren.

Besonderer Dank gebührt meiner Verlobten, Michelle Dubs, für ihre Geduld und ihr Interesse, sich meine Ideen und Zweifel immer wieder anzuhören und dafür, dass sie mir motivierend zur Seite stand.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theoretischer Hintergrund	3
2.1. <i>Die Begriffe Navigation und Ortung</i>	3
2.2. <i>Die Positionsbestimmung und Navigation vor der Moderne</i>	3
2.3. <i>Die Positionsbestimmung und Navigation in der Moderne</i>	4
2.4. <i>Die Grundlagen der Koordinatensysteme</i>	5
2.4.1. Die Modelle der Erdform	5
2.4.1.1. Modell „Ebene“	5
2.4.1.2. Modell „Kugel“	6
2.4.1.3. Modell „Rotationsellipsoid“	6
2.4.1.4. Modell „Geoid“	7
2.4.2. Das geographische Gitter	8
2.4.3. Das geodätische Gitter	9
2.4.4. Das ECEF-Koordinatensystem	10
2.4.5. Die Höhenbestimmung	12
2.5. <i>Das Prinzip der Positionsbestimmung</i>	13
2.5.1. Die Ermittlung der Position	13
2.5.2. Der Signallauf	15
2.5.3. Die Synchronisierung der Uhren – Der Zeitfehler	16
2.5.4. Die Berechnung der Position	17
2.6. <i>Die Zeitbestimmung</i>	18
2.6.1. Die koordinierte Weltzeit - UTC	18
2.6.2. Die GNSS-Systemzeit	19
2.7. <i>Das Signal</i>	20
2.7.1. Die elektromagnetische Welle	20
2.7.2. Die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	21
2.7.3. Der Doppler-Effekt	22
2.7.4. Signalausbreitung in der Erdatmosphäre	23
2.7.4.1. Ionosphärische Refraktion	24
2.7.4.2. Troposphärische Refraktion	25
2.7.5. Signalstruktur	25
2.7.6. Auswertung der Signale	26
2.8. <i>Aufbau der Satellitensysteme</i>	26

2.8.1.	Das Weltraumsegment - die Satelliten	26
2.8.1.1.	Die Keplerschen Gesetze	26
2.8.1.2.	Die Satellitenposition	27
2.8.1.3.	Die Satellitenkonstellationen	29
2.8.1.4.	Aufbau der Satelliten	30
2.8.1.5.	Relativistische Effekte	31
2.8.2.	Das Kontrollsegment – die Bodenstationen	32
2.8.3.	Das Benutzersegment	32
2.9.	<i>Mögliche Fehlerquellen</i>	33
2.9.1.	Fehler bei der Messung der Pseudoentfernung	33
2.9.2.	Fehler durch äußere Einflüsse	35
2.9.3.	Fehler der Position durch geometrische Verhältnisse	35
3.	Anwendung im Physikunterricht	36
3.1.	<i>Gründe für GPS im Physikunterricht</i>	36
3.2.	<i>Verschiedene GPS-Tracker für Smartphones im Vergleich</i>	37
3.2.1.	phyphox (Android und IOS)	40
3.2.2.	Komoot (Android und IOS)	41
3.2.3.	Geo-Tracker (Android)	42
3.2.4.	GPX-Tracker (IOS)	43
3.2.5.	GPS-Tracker (IOS)	44
3.2.6.	GPS-Tracks (IOS)	45
3.3.	<i>Datenauswertung und Darstellung</i>	45
3.3.1.	Google Earth	46
3.3.2.	Web-Programm	47
3.3.3.	Microsoft Excel	48
3.3.3.1.	Anleitung und Aufbau der Exceldatei	49
3.3.3.2.	Erklärung der verwendeten Befehle	51
3.4.	<i>Mögliche Experimente</i>	53
3.4.1.	Zeichnen von GPS-Bildern	54
3.4.1.1.	Grundlagen	54
3.4.1.2.	Beschreibung der Experimente	55
3.4.1.3.	Einordnung in den Physikunterricht	56
3.4.2.	Gleichförmige Bewegungen	56
3.4.2.1.	Grundlagen	56
3.4.2.2.	Beschreibung der Experimente	57
3.4.2.3.	Einordnung in den Physikunterricht	59

3.4.3.	Beschleunigte Bewegungen	60
3.4.3.1.	Grundlagen	60
3.4.3.2.	Beschreibung der Experimente	60
3.4.3.3.	Einordnung in den Physikunterricht	63
3.4.4.	Kreisbewegung	64
3.4.4.1.	Grundlagen	64
3.4.4.2.	Beschreibung des Experiments	65
3.4.4.3.	Einordnung in den Physikunterricht	67
3.4.5.	Weitere Möglichkeiten	68
3.5.	<i>Schlussbetrachtung</i>	70
4.	Literaturverzeichnis	72
5.	Abbildungsverzeichnis	74
6.	Anhang	80
<i>I.</i>	<i>Abbildungen</i>	<i>80</i>
<i>II.</i>	<i>Inhalt der beiliegenden CD</i>	<i>80</i>
<i>III.</i>	<i>Programmcode für Excel Makros</i>	<i>81</i>
<i>IV.</i>	<i>Versicherung</i>	<i>83</i>

1. Einleitung

Die Nutzung von satellitengestützter Ortung ist allgegenwärtig. Neben dem Einsatz im Flug- und Schiffsverkehr lassen sich Autofahrer mittels Navigationsgeräten von A nach B leiten. Speditionen berechnen die günstigsten Routen zum Warentransport. Selbst im Freizeitsport beim Radfahren oder Wandern findet die satellitengestützte Navigation zur Orientierung in fremden Städten oder unbekanntem Gelände Anwendung. Die im allgemeinen Sprachgebrauch kurz „GPS“ genannte Technik (nach dem ersten amerikanischen System NAVSTAR-GPS) ist in unserem Alltag kaum mehr wegzudenken.

Auch die Möglichkeit, eigene Bewegungen aufzunehmen und im Anschluss wechselnde Geschwindigkeiten zu analysieren, ist nicht nur für Profisportler relevant.

Für den Physikunterricht in der Schule ist nicht nur die Frage interessant: Wie funktioniert die Ortung? Vielmehr können Experimente, bei denen GPS-Tracker Anwendung finden, den Unterricht bereichern, indem die Schülerinnen und Schüler Bewegungen in Experimenten selbst erfahren, wahrnehmen, mittels der Technik aufzeichnen und analysieren.

Im Zuge der Digitalisierung sind an vielen Schulen mittlerweile Tablets im Klassensatz vorhanden. Da Schülerinnen und Schüler heutzutage häufig ein eigenes Smartphone besitzen, ist nach dem Motto „Bring Your Own Device“ (Nutze dein eigenes Gerät) diese Technik mit den entsprechenden Apps ohne Weiteres im Unterricht oder bei Projekten nutzbar.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich im ersten Teil mit der Funktionsweise der satellitengestützten Navigation, um eine wissenschaftliche Grundlage zu bilden.

Der zweite Teil behandelt die Anwendungsmöglichkeiten im Physikunterricht. Dabei werden Möglichkeiten vorgestellt, das Smartphone oder Tablet als Experimentiergerät zu verwenden. Aufgrund verschiedener Betriebssysteme gibt es keine einheitliche Technik für die Aufnahme der Bewegung, weshalb verschiedene Apps mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen verglichen werden. Die Auswertung und Darstellung der gesammelten Daten erfolgt in speziell für diese Anwendungen modifizierten Programmen. Darüber hinaus werden in der

vorliegenden Arbeit Ideen für die praktische experimentelle Umsetzung der Kinematik im Physikunterricht aufgeführt.

2. Theoretischer Hintergrund

Das folgende Kapitel beschäftigt sich zunächst mit dem Unterschied zwischen Navigation und Ortung, sowie mit der historischen Entwicklung der Positionsbestimmung. Darüber hinaus wird in dem Kapitel die Funktionsweise der satellitengestützten Ortung erklärt.

2.1. Die Begriffe Navigation und Ortung

Die zwei Begriffe Navigation und Ortung hängen stark zusammen. Die Aufgabe der Ortung besteht darin, die Position von einem Körper zu einer gewissen Zeit zu bestimmen. Die Positionsbestimmung beantwortet hingegen nur die Frage: „Wo befinde ich mich?“ Die Ortung wird im Alltag bei der Objekt- oder Landvermessung bzw. zur Überwachung des Verkehrs, zum Beispiel im Luftraum oder in der Seefahrt, eingesetzt. Im Privaten kann die Ortung verwendet werden, um Haustiere, Gegenstände (wie zum Beispiel Smartphones) oder bei Großveranstaltungen kleine Kinder nicht zu verlieren. (Bauer, 2011)

Die Navigation befasst sich mit der Frage: „Wie komme ich zu einem gewissen Punkt?“ Diese Frage kann nur beantwortet werden, wenn bekannt ist, an welchem Ort sich ein Körper zunächst befindet. Die Ortung ist somit ein zentraler Bestandteil der Navigation. Das Ortungsergebnis, beispielsweise in Form von Zahlenwerten, muss dabei nicht zwangsläufig in Erscheinung treten (Mansfeld, 2010). Die Navigation führt also ein bewegliches Objekt von einem Ausgangspunkt auf einem vorgegebenen Weg zu einem Zielort. Sie ist ein wichtiger Bestandteil der Luft- und Raumfahrt sowie der Fahrt zu Wasser und zu Land.

2.2. Die Positionsbestimmung und Navigation vor der Moderne

Bereits seit der frühen menschlichen Evolution müssen sich Menschen in der Natur orientieren und zielgenau bewegen. Anhand von Merkmalen in der Natur, wie zum Beispiel Flussmündungen oder Lichtungen, wurden wichtige Orte wie Jagd- oder Weideplätze verbal oder durch Skizzen innerhalb des Stammes kommuniziert. Eine mögliche Beschreibung könnte lauten:

„Folge dem Fluss, bis du zu einer Bachmündung kommst. Von dort gehe in Richtung des großen Berges, den du in der Ferne siehst. Auf dem Weg wirst du die Weide finden.“

Solche Beschreibungen, angepasst auf die heutigen Gegebenheiten, gibt es immer noch, wenn man sich ohne Navigationsgerät in einer fremden Stadt bewegen möchte. Die Route wird anhand von Kreuzungen, Straßennamen oder anderen markanten Punkten, wie zum Beispiel Gebäuden erklärt.

Mit Aufkommen der Seefahrt und dem Verlassen der heimischen Gebiete mussten die Menschen auf andere Arten der Positionsbestimmung zurückgreifen, da es auf dem Ozean keine eindeutigen Punkte gibt. Mithilfe des Jakobsstabs konnten die Seefahrer über einen Fixstern (z.B. Polarstern) den Höhenwinkel messen und die Position auf See bestimmen. Der Höhenwinkel über dem Horizont entsprach dabei der geographischen Breite. Präzisere Messungen waren erst nach der Erfindung des Sextanten im 18. Jahrhundert möglich. (Hänel, 2006).

2.3. Die Positionsbestimmung und Navigation in der Moderne

Im Jahr 1904 zeigte Christian Hülsmeier eine Möglichkeit mithilfe von Radiowellen Objekte aus Metall über mehrere Kilometer Entfernung aufzuspüren. Durch Messen der Laufzeit, der Radiowellen, konnte die Entfernung zu den Objekten bestimmt werden. Die Radar-Technologie (**R**adio **D**etection and **R**anging, frei übersetzt als „Funkgestützte Ortung und Abstandsmessung“) wird in unterschiedlichen Ausführungen heutzutage zivil und militärisch in der Schiff- und Luftfahrt genutzt. (Sandoval, 2010)

Die erste satellitengestützte Positionsbestimmung wurde 1958 von den USA mithilfe der Erkenntnisse des ersten russischen Satelliten Sputnik entwickelt. Dieses Ortungssystem, sollte durch umlaufende Satelliten eine genaue und weltweite Navigation ermöglichen. Im Jahr 1964 erfolgte die zivile Freigabe unter dem Namen TRANSIT. In den folgenden Jahren entwickelten die USA das neue Ortungssystem NAVSTAR-GPS (**N**avigation **S**ignal **T**iming and **R**anging-**G**lobal **P**ositioning **S**ystem). Dieses war zur Zeit der Fertigstellung im Jahr 1992 das leistungsfähigste System für Navigation und Ortung. Ziel war es, neben genauerer Ortung und Geschwindigkeitsbestimmung ein System zu erschaffen, auf das

unbegrenzt viele Nutzer gleichzeitig zugreifen konnten. (Bauer, 2011; Mansfeld, 2010, 2010)

Die ehemalige Sowjetunion entwickelte auf den Grundprinzipien von NAVSTAR-GPS ein eigenes System und nahm das GLONASS (**G**lobalnaya **N**avigatsionnaya **S**putnikovaya **S**istema) im Jahr 1996 in Betrieb. (Bauer, 2011; Mansfeld, 2010)

Die europäische Union entwickelt seit 1999 zusammen mit anderen Staaten wie z.B. der Schweiz, China, Südkorea und Indien ein neues Satellitenortungssystem. Ziel ist es, neben den militärisch kontrollierten Systemen der USA und Russland, ein Ortungssystem unter rein ziviler Kontrolle zu schaffen. (Bauer, 2011; Mansfeld, 2010)

2.4. Die Grundlagen der Koordinatensysteme

Um eine Position anzugeben, wird ein Bezugspunkt benötigt. Hierzu werden Koordinatensysteme genutzt. Dabei ist das Koordinatensystem verknüpft mit der Form der Erde. In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Modelle der Erdform vorgestellt, auf denen die in Abschnitt 2.4.3 – 2.4.4 beschriebenen Koordinatensysteme aufbauen, welche heutzutage von Satelliten verwendet werden.

2.4.1. Die Modelle der Erdform

Wie bereits erklärt wird für eine exakte Karte eine genaue Vorstellung von der Erdform benötigt. Die unebene Erdoberfläche sorgt aber dafür, dass sich die Form nur schwer mathematisch beschreiben lässt. Aus diesem Grund gibt es verschiedene Modelle, die jeweils für verschiedene Messungen genutzt werden können. (Bauer, 2011)

2.4.1.1. Modell „Ebene“

Im Mittelalter waren die Menschen in Europa der Überzeugung, dass die Erde eine Scheibe sei. Die Vorstellung einer horizontalen Fläche, welche sich in der

X-Y-Ebene aufspannt, ist dabei ausreichend, wenn es sich um ein eher kleines Messgebiet mit geringen Genauigkeitsansprüchen handelt. Die satellitengestützte Ortung muss jedoch sehr genau und global funktionieren, weshalb das Modell der Erde als Ebene nicht genutzt werden kann. (Bauer, 2011)

2.4.1.2. Modell „Kugel“

Historisch betrachtet vermutete ein Teil der Menschheit bereits vor dem Mittelalter, dass die Erde ein kugelförmiges Gebilde sein müsste. Bei der heutigen Darstellung von Erdaufnahmen aus dem All gibt es jedoch keine Zweifel mehr. Das Modell der Erde als Kugel (Abbildung 1) mit einem Radius von 6370 km ist bei Karten mit einem kleinen Maßstab ausreichend. (Bauer, 2011)



Abbildung 1 Erdkugel (<https://pixabay.com/de/illustrations/globus-erde-welt-transparenz-1348777/>) [abgerufen am 22.03.2023]

2.4.1.3. Modell „Rotationsellipsoid“

Isaac Newton berechnete, dass die Erde aufgrund der Rotation und der damit verbundenen Zentrifugalkraft am Äquator etwas aufgewölbt und dafür an den Polen etwas abgeplattet sei (Bauer, 2011). Bei dieser neuen Darstellungsform handelt es sich um ein Rotationsellipsoid (Abbildung 2) welches mathematisch beschrieben werden kann.

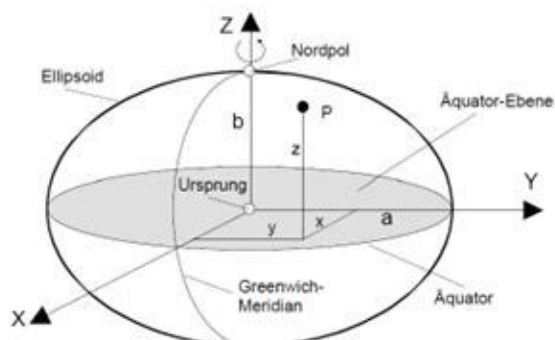


Abbildung 2 Rotationsellipsoid (Zogg, 2011, S. 22)

Das Rotationsellipsoid ist dabei der tatsächlichen Erdoberfläche im Mittel angepasst (Mansfeld, 2010). Dabei wird die unterschiedliche Masseverteilung der Erde (Wasser-Land-Verteilung, Gebirge) nicht berücksichtigt.

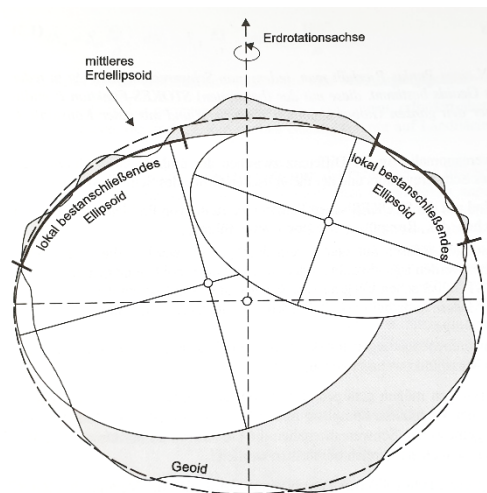


Abbildung 3 lokal anschließende Ellipsoide (Bauer, 2011, S. 22)

Land	Lagevermessung		Höhenvermessung	
	Ellipsoid	Lagerungspunkt	Datumspunkt	Höhensystem
Frankreich	Clarke 1880	Pantheon	Marseille	Normalhöhe
Belgien	Hayford 1924	Ukkel	Ostende	orthometrisch
Niederlande	Bessel 1841	Amersfoort	Amsterdam	orthometrisch
Polen	Krassowski 1942	Pulkowo	Kronstadt	Normalhöhe
Österreich	Bessel 1841	Hermannskogel	Triest	normalorthometrisch
Schweiz	Bessel 1841	Bern	Marseille	orthometrisch
Italien	Hayford 1924	Rom	Genova, Catania	orthometrisch
Spanien	Hayford 1924	Potsdam (ED50)	Alicante	orthometrisch
Portugal	Bessel 1841	Lissabon	Cacais	orthometrisch
Deutschland (West)	Bessel 1841	Rauenberg	Amsterdam	normalorthometrisch
Deutschland (Ost)	Krassowski 1942	Pulkowo	Kronstadt	Normalhöhe
Deutschland (vereinigt)	GRS80	(ETRS89)	Amsterdam	Normalhöhe

Abbildung 4 Auswahl an geodätischen Referenzmodellen (Bauer, 2011, S. 39)

Um sich der Erdform jedoch möglichst genau anzunähern, entwickelten verschiedene Länder und Behörden eigene Referenzmodelle. In Deutschland wurde das offizielle Referenzmodell als „Potsdamer Datum“ bezeichnet und basierte auf dem Bessel Ellipsoid. Als Grundlage des GPS setzte sich das weltweit gültige Referenzellipsoid WGS-84 (World Geodetic System 1984) durch. (Bauer, 2011)

2.4.1.4. Modell „Geoid“

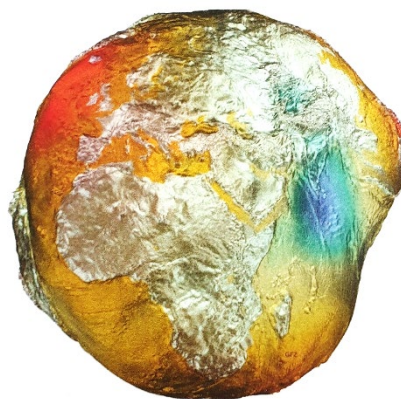


Abbildung 5 stark übertriebenes Geoid „Potsdamer Schwerekartoffel“ (Dickmann, 2018, S. 31)

Da das Rotationsellipsoid die Masseverteilung auf der Erde vernachlässigt, wurde ein neues Modell erstellt (Abbildung 5). Die Form des Geoids orientiert

sich an der ungleichen Masseverteilung des Erdkörpers. Unterschiedliche Dichteverhältnisse an der Erdoberfläche sorgen dafür, dass das Lot nicht, wie bei einer gleichmäßig dichten Kugel, zum Erdmittelpunkt zeigt, sondern auf dem Weg zahlreiche Ablenkungen erfährt. (Dickmann, 2018)

Der Mathematiker Carl Friedrich Gauss definierte im 19. Jahrhundert Flächen, bei denen das Lot an allen Punkten senkrecht steht. Von diesen Flächen, auch Niveau- oder Äquipotenzialflächen genannt, gibt es zwischen dem Erdkern und dem näheren Weltraum beliebig viele. Beim Geoid wird eine dieser Äquipotenzialflächen, die Höhe des mittleren Meeresspiegels, dargestellt. (Dickmann, 2018)

Aufgrund der unregelmäßig geformten Oberfläche kann das Geoid nicht durch eine mathematische Formel beschrieben und als Bezugsfläche für Punkte genutzt werden (Dickmann, 2018). Das Modell des Geoids findet aber in der Höhenbestimmung Verwendung (siehe Kapitel 2.4.5).

2.4.2. Das geographische Gitter

Ein bekanntes globales Koordinatensystem ist das geographische Gitter. Im Gitter wurde die Erdoberfläche in 360 Längen- und 180 Breitengrade unterteilt. Der nullte Breitengrad entspricht dabei dem Äquator. Der nullte Längengrad wird als Nullmeridian bezeichnet. Er ist dadurch definiert, dass er die Sternwarte in Greenwich bei London durchquert. Die Längen- und Breitengrade bilden somit ein Netz aus nicht-rechtwinkligen Vierecken, da die Längengrade jeweils an den Polen der Erde zusammenlaufen und sich deshalb die Rechtecke verjüngen. Zusätzlich wurden Grad [°] in Minuten ['] und Sekunden ["] unterteilt. (Dickmann, 2018)

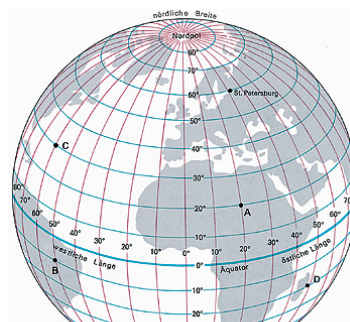


Abbildung 6 geographisches Gitter (<https://www.klett.de/sixcms/media.php/427/gradnetz00.jpg>) [abgerufen am 21.03.2023]

2.4.3. Das geodätische Gitter

Da es nicht möglich ist, eine Kugel ohne Verzerrungen auf einer zweidimensionalen Ebene darzustellen, wurde das geodätische Gitter entwickelt. Das UTM-Gitter (Universal Transverse Mercator-Gitter bezeichnet das bei Erstellung verwendete Projektionsverfahren) teilt die Erdoberfläche in ca. 1200 einzelne Abschnitte ein. Die Abschnitte sind dabei so klein, dass ein möglicher Verzerrungseffekt durch die Wölbung der Erdoberfläche vernachlässigt werden kann. Die Einteilung erfolgt in Zonenstreifen und Breitenbänder.

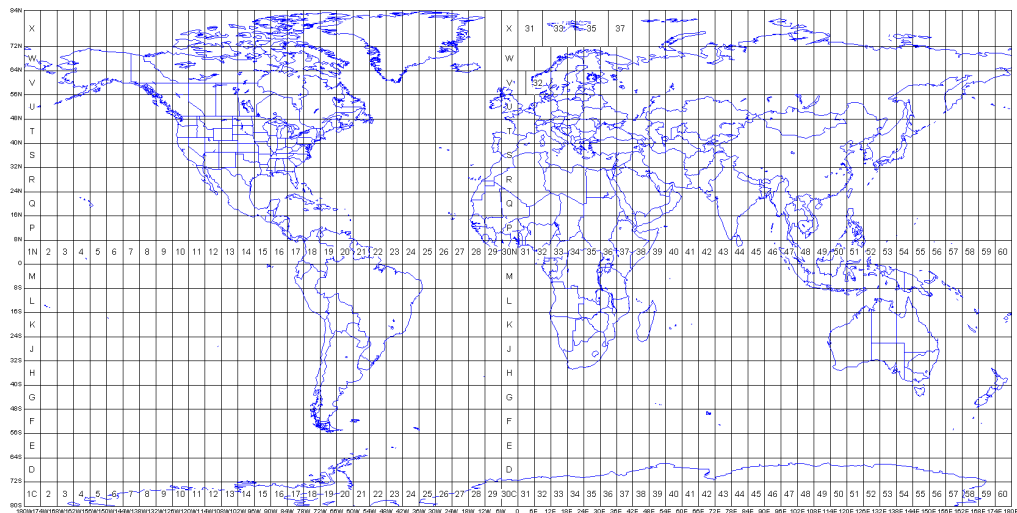


Abbildung 7 UTM-Gitter (<https://www.dmap.co.uk/utmworld.gif>) [abgerufen am 21.03.2023]

Für die Aufteilung wird die Fläche in 60 Zonenstreifen (Verlauf von Nord nach Süd) mit je sechs Längengraden unterteilt. Dabei liegt der Mittelmeridian nicht auf dem Nullmeridian, sondern im Pazifik auf der Datumsgrenze. Zur einfacheren Lagebestimmung werden die Zonenstreifen in jeweils 8° breite Bänder unterteilt und mit den Buchstaben C bis X versehen. In Abbildung 7 fällt auf, dass die Buchstaben I und O fehlen, da eine hohe Verwechslungsgefahr mit J und 0 besteht. (Dickmann, 2018)

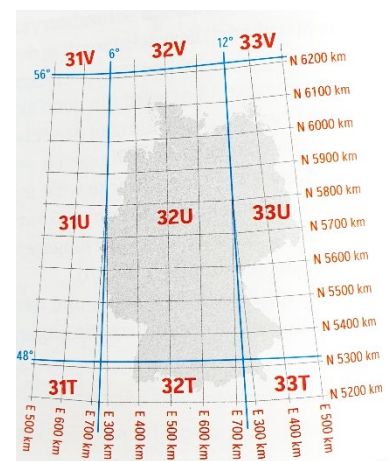


Abbildung 8 Lage des UTM-Gitters in Deutschland (Dickmann, 2018, S. 110)

2.4.4. Das ECEF-Koordinatensystem

Beim ECEF-Koordinatensystem (**E**arth **C**entered **E**arth **F**ixed) handelt es sich um ein erdfestes Bezugssystem. Die bisher beschriebenen Systeme sind an die Erdoberfläche gebunden, was jedoch problematisch für Satelliten ist, da diese sich im mittleren Erdorbit mit einer Höhe von 23000 km über der Erdoberfläche befinden (Mansfeld, 2010). Das ECEF nutzt das WGS-84 als Referenzsystem aufgrund der festgelegten Parameter (Bauer, 2011). Darüber hinaus wird das vom GPS benutzte dreidimensionale geozentrische kartesische Koordinatensystem wie folgt definiert:

1. Koordinatenursprung: Massenmittelpunkt der Erde
2. Z-Achse Erdrotationsachse
3. XZ-Achse definiert durch die Z-Achse und einen ausgesuchten Punkt auf der Erde (Sternwarte von Greenwich)
4. Y-Achse senkrecht zur Z-Achse

Nach (Bauer, 2011; Mansfeld, 2010).

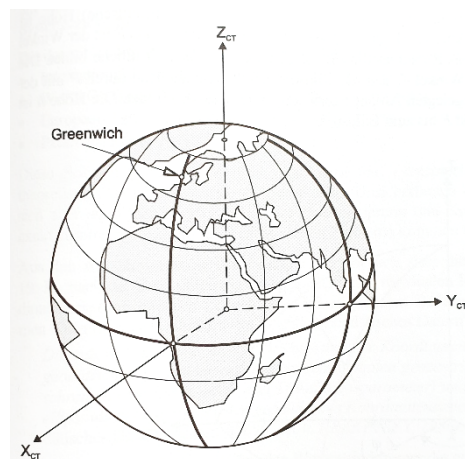


Abbildung 9 ECEF-Koordinatensystem (Bauer, 2011, S. 45)

Durch dieses Kartensystem können alle Punkte auf oder über der Erdoberfläche durch Koordinaten beschrieben werden. Alle Systeme rechnen zunächst mit diesen Koordinaten. Je nach Einstellungen des Benutzers werden die dreidimensionalen Koordinaten direkt in das gewünschte Koordinatensystem, z.B. UTM umgerechnet. Die Umrechnung vom globalen Referenzmodell (z.B. WGS84) in das lokale Referenzmodell (z.B. Potsdamer Datum) wird Datumstransformation genannt. (Bauer, 2011)

Bei diesem Koordinatensystem handelt es sich jedoch strenggenommen um kein Inertialsystem mit den Eigenschaften:

- Der Koordinatenursprung ist entweder in Ruhelage oder er führt eine lineare Bewegung durch.
- Die Richtungen der Koordinatenachse sind raumfest.

Durch die Bewegung der Erde auf einer Ellipsenbahn um die Sonne bewegt sich der Koordinatenursprung nicht linear. Die daraus resultierenden Kräfte auf den Satelliten können jedoch aufgrund der geringen Größe vernachlässigt werden.

Die Präzessionsbewegung (Rotation der Erde) und die Nutationsbewegung (Bewegung des Mondes um die Erde) sorgen dafür, dass die Z-Achse des Koordinatensystems nicht raumfest ist. Um dieses Koordinatensystem als raumfest und somit auch als Inertialsystem zu definieren, wurde eine Konvention getroffen:

- Die Lage der Erdachse am 1. Januar 2000 ist die Z-Achse des Koordinatensystems.
- Die X-Achse liegt in der Ebene senkrecht zur Z-Achse in der Äquatorebene in Richtung zum konventionellen Frühlingspunkt (liegt in Richtung der Äquatorebene vom 1.1.2000 mit der Ebene der Ekliptik).

(Bauer, 2011, S. 55)

2.4.5. Die Höhenbestimmung

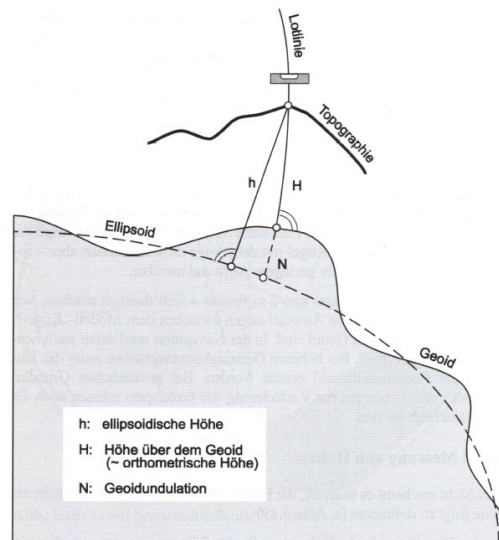


Abbildung 10 ellipsoidische Höhe und orthometrische Höhe (Bauer, 2011, S. 24)

Bei der satellitengestützten Positionsbestimmung erhält man neben dem Längen- und Breitengrad auch eine Höhe des Punktes. Die geometrische Definition der elliptischen Höhe lautet: Die elliptische Höhe eines Punktes P ist gleich der Länge des Lots vom Punkt P auf das Ellipsoid (Bauer, 2011, S. 23).

In der Praxis kann der Höhenwert z.B. bei der Vermessung von Wasserflächen zu Problemen führen. In der Vorstellung ist die Höhe einer ruhigen Wasseroberfläche überall gleich.

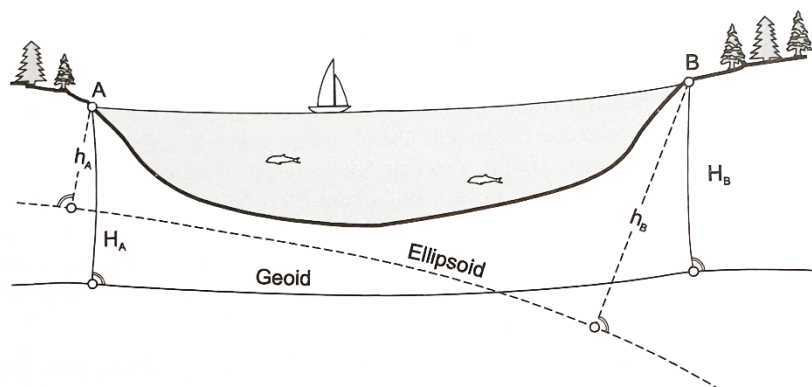


Abbildung 11 ellipsoidische und orthometrische Höhen bei einer Wasseroberfläche (Bauer, 2011, S. 24)

In Abbildung 11 wird jedoch deutlich, dass die zwei Punkte A und B am Ufer verschiedene ellipsoidische Höhen h_A und h_B haben. Aus diesem Grund ist das in Kapitel 2.4.1.4. bereits beschriebene Geoid für die Höhenmessung wichtig. Dadurch lässt sich eine orthometrische Höhe H_A und H_B , welche der Länge zwischen Punkt und Geoid entspricht, bestimmen. (Bauer, 2011)

Die vom GPS-Gerät empfangenen Höhenangaben sind demnach zunächst ellipsoidische Höhen in Bezug auf WGS84. Einige Smartphones und auch GPS-Empfänger besitzen für die Höhenmessung eingebaute Barometer. Manche Geräte können auch umgestellt werden, sodass die ellipsoidische Höhe automatisch in eine orthometrische Höhe umgerechnet wird.

2.5. Das Prinzip der Positionsbestimmung

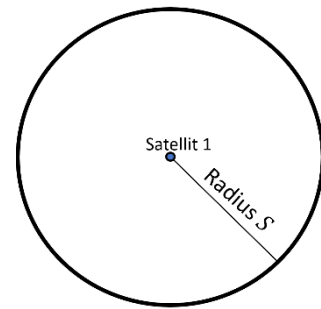
Die Satellitenortung kann autonom oder kooperativ erfolgen. Bei der autonomen Ortung wird die Ortung durch das Gerät selbst durchgeführt. Im Vergleich dazu werden bei der kooperativen Ortung weitere Einrichtungen wie z.B. Bodenortungssysteme eingesetzt, um die Position zu bestimmen. Es wird dabei zwischen Eigenortung und Fremdortung unterschieden. Bei der Fremdortung befindet sich der Sender an der zu ortenden Position und sendet Signale an den Empfänger. Dieser befindet sich an einem bekannten Ort und kann mithilfe des Signals des Senders die Position bestimmen. Die Position kann auch über ein zweites Signal an den Sender übermittelt werden. Beispiele hierfür wären das Aufspüren von Verbrechern durch die Polizei oder Radarketten bei der Flugsicherung. Im Vergleich dazu werden bei der Eigenortung die Signale von einem Sender, der sich an einer bekannten Position befindet, ausgestrahlt und vom Empfänger an der unbekannt Position empfangen und ausgewertet. (Mansfeld, 2010)

2.5.1. Die Ermittlung der Position

Die Bestimmung der Position basiert auf der Laufzeitmessung des Signals vom Satelliten zum Empfänger. Dieses Prinzip kann mit der Zählmethode bei einem Gewitter verglichen werden. Dabei gibt der Blitz den Start der Messung an und das Geräusch des Donners die Stoppzeit. Die Entfernung des Gewitters kann nun durch Multiplikation der Laufzeit und der Schallgeschwindigkeit ungefähr errechnet werden.

Ähnlich funktioniert die Ortung mithilfe von Satelliten. Der Satellit sendet ein Signal aus, welches sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet und nach kurzer Zeit vom Empfänger empfangen wird.

Die berechnete Entfernung entspricht dem Radius um den Sender. Im zweidimensionalen Raum kann sich nun der Empfänger an jedem Punkt auf dem Kreisbogen befinden, was eine eindeutige Ortung nicht ermöglicht (Abbildung 12).



Ein zweiter Satellit als Sender sorgt dafür, dass der Empfänger ein weiteres Signal empfängt und die Entfernung zum zweiten Satelliten berechnen kann.

Durch Kombination der beiden Radien zeigt sich, dass es nur zwei mögliche Punkte (A und B) gibt, an denen sich der Empfänger befinden könnte (Abbildung 13).

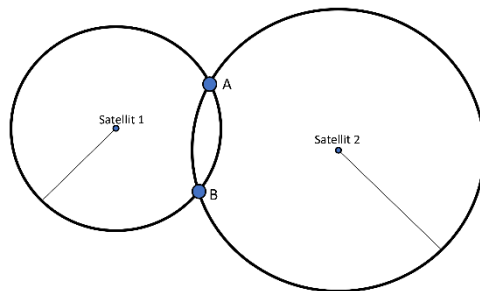


Abbildung 13 Entfernungsbestimmung bei zwei Signalquellen (nach Kaplan & Hegarty, 2017, S. 21)

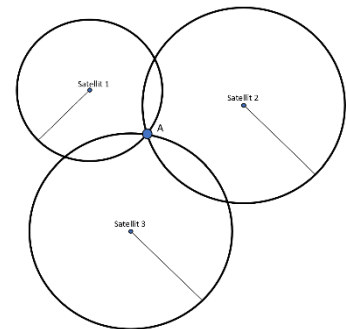


Abbildung 14 Entfernungsbestimmung bei drei Signalquellen (nach Kaplan & Hegarty, 2017, S. 21)

Durch Triangulation, die Nutzung eines weiteren Senders, lässt sich eine genaue Ortsbestimmung durchführen (Abbildung 14). (Kaplan & Hegarty, 2017)

Im dreidimensionalen Raum bilden sich um die einzelnen Satelliten keine Kreise, sondern Kugeln mit den Radien S (Abbildung 15). Dabei zeigt sich, dass bei der Nutzung von drei Satelliten zwei Schnittpunkte mit den anderen Kugeln zustande

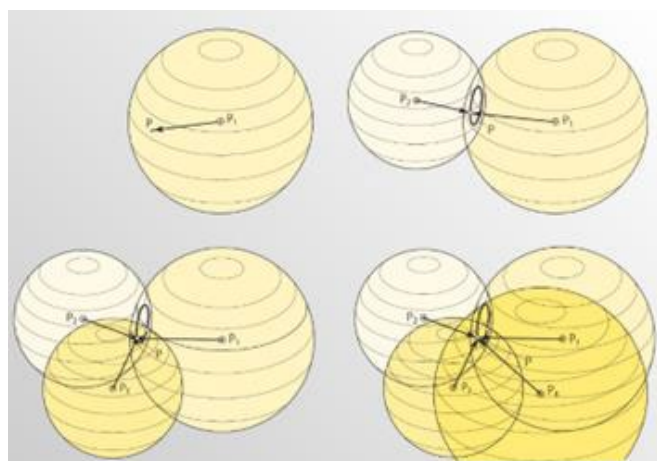


Abbildung 15 Triangulierung und Quadrangulierung im Raum (Braun & Wilhelm, 2008, S. 21)

kommen. In der Praxis kann die Erde selbst als weitere Kugel betrachtet werden,

an deren Oberfläche sich der Empfänger befinden muss. Hierdurch kann ein falscher Punkt ausgeschlossen werden, der z.B. im Erdinneren liegt.

Alternativ kann ein weiterer Satellit genutzt werden (Abbildung 15). In diesem Fall erfolgt die Standortbestimmung nicht mehr durch Triangulierung sondern durch Quadrangulierung, da nun vier Satelliten verwendet werden (Dodel, 2010).

2.5.2. Der Signallauf

Die Positionsdaten werden mittels eines Signals übertragen. Dabei können die Daten via Einweg-Methode oder mithilfe der Zwei-Wege-Methode ausgetauscht werden (Mansfeld, 2010). Um die Entfernung zwischen Sender und Empfänger bei der Zwei-Wege-Methode zu bestimmen, wird von der zu ortenden Stelle ein Signal zum Zeitpunkt t_0 ausgestrahlt. Da es sich bei den Signalen um elektromagnetische Wellen handelt, wird die Geschwindigkeit $c = 2,99793 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ zum Durchlaufen der Strecke angenommen. Nachdem das Signal zum Zeitpunkt t_1 empfangen wurde, wird es in umgekehrter Richtung als Antwortsignal ausgestrahlt und wird vom Empfänger an der unbekannt Position zum Zeitpunkt t_2 empfangen (Abbildung 16). Das Signal durchläuft die Strecke immer zweimal. Die Entfernung s kann durch

$$s = \frac{c}{2} (t_2 - t_0) \quad (1)$$

bestimmt werden.

Problematisch an dieser Messmethode ist, dass jeder Nutzer für das Signal einen gewissen Frequenzbereich benötigt. Dies sorgt im Umkehrschluss dafür, dass nur eine gewisse Anzahl von Personen das System gleichzeitig nutzen kann, was wiederum wie in 2.3 beschrieben nicht das Ziel der Satellitenortung ist.

Dieses Problem wird bei der Ein-Weg-Methode umgangen. Wie der Begriff vermuten lässt, wird das Signal einmal von der Funkstelle zum Zeitpunkt t_0 an die zu ortende Stelle gesendet und zum Zeitpunkt t_1 empfangen (Abbildung 16). Die Entfernung s lässt sich durch

$$s = c(t_1 - t_0) \quad (2)$$

berechnen.

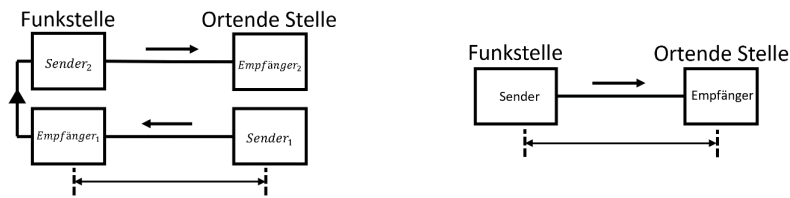


Abbildung 16 Zwei-Wege-Methode und Ein-Weg-Methode (nach Mansfeld, 2010, S. 7)

Weitere Information zu Ausbreitung und Eigenschaften der Signale werden in Kapitel 2.7 behandelt.

2.5.3. Die Synchronisierung der Uhren – der Zeitfehler

Die beschriebenen Methoden setzen eine genaue Übereinstimmung der Uhren bei Sender und Empfänger voraus. Im eindimensionalen Raum kann bereits bei einem Zeitfehler von $\Delta t = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$, die berechnete Position um $\Delta s \pm 300 \text{ m}$ verschoben sein (Abbildung 17).

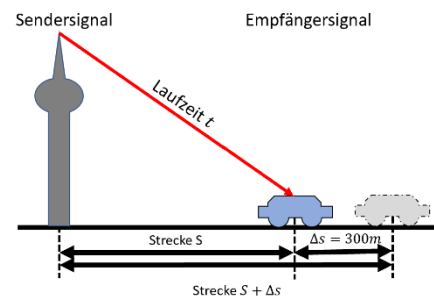


Abbildung 17 eindimensionale Positionsbestimmung mit Zeitfehler (nach Zogg, 2011, S. 12)

Aus diesem Grund sind in den Satelliten Atomuhren verbaut. Da jedoch aufgrund der hohen Anschaffungskosten nicht in jedem Empfänger eine Atomuhr verbaut sein kann, muss der Zeitfehler Δt anders, durch Nutzung eines zweiten Senders, entfernt werden. Somit kann die Position im eindimensionalen Raum genau bestimmt werden (Abbildung 18).

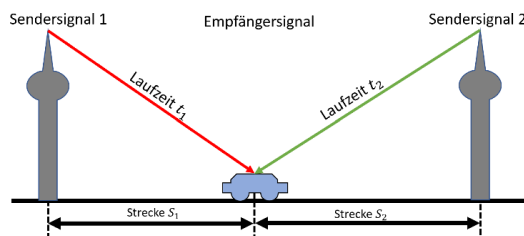


Abbildung 18 eindimensionale Bestimmung ohne Zeitfehler (nach Zogg, 2011, S. 13)

Bei drei Satelliten im zweidimensionalen Raum entsteht durch den Zeitfehler kein gemeinsamer Schnitt, also keine eindeutige Position A, sondern eine Fläche zwischen den Punkten B (Abbildung 19), in der sich der Empfänger befinden könnte (Kaplan & Hegarty, 2017).

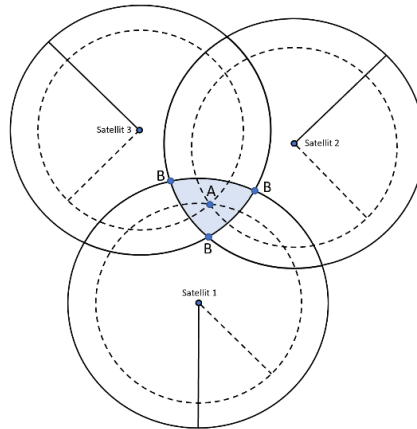


Abbildung 19 Auswirkung des Zeitfehlers auf die Pseudostrecken (nach Kaplan & Hegarty, 2017, S. 22)

Wenn dieses Beispiel nun auf den räumlichen Fall übertragen wird und die Kreislinien als Kugeln betrachtet werden, dann bildet sich in der Mitte eine konkave Pyramide aus den jeweiligen Seitenflächen der Kugeln. In diesem Bereich würde sich nun der Empfänger befinden.

2.5.4. Die Berechnung der Position

Mathematisch lässt sich die Position durch den räumlichen Pythagoras bestimmen.

$$S = \sqrt{(X_{Sat} - X_E)^2 + (Y_{Sat} - Y_E)^2 + (Z_{Sat} - Z_E)^2} \quad (3)$$

Dabei sind X_E , Y_E und Z_E die unbekanntenen Empfängerkoordinaten und X_{Sat} , Y_{Sat} und Z_{Sat} die bekannten Satellitenkoordinaten.

Durch den Zeitfehler werden die gemessenen Strecken auch Pseudostrecken genannt (Bauer, 2011). Die tatsächliche Strecke S als Radius zwischen dem Satelliten und Empfänger wird durch

$$S = c(\Delta T + \Delta t) \quad (4)$$

berechnet. Dabei ist Δt der unbekannte Zeitfehler und ΔT die gemessene Laufzeit. Um weitere Messfehler zu vermeiden, müssen alle Satelliten zu einem

festen Zeitpunkt t_0 ein Signal senden. Sämtlich Satellitenuhren sind hierfür auf die GPS-Systemzeit (Kapitel 2.6.2) synchronisiert. Es werden somit vier Gleichungen für die vier unbekanntenen Größen (Δt , X_E , Y_E und Z_E) benötigt.

$$S_1 = c(\Delta T_1 + \Delta t) = \sqrt{(X_1 - X_E)^2 + (Y_1 - Y_E)^2 + (Z_1 - Z_E)^2} \quad (5)$$

$$S_2 = c(\Delta T_2 + \Delta t) = \sqrt{(X_2 - X_E)^2 + (Y_2 - Y_E)^2 + (Z_2 - Z_E)^2} \quad (6)$$

$$S_3 = c(\Delta T_3 + \Delta t) = \sqrt{(X_3 - X_E)^2 + (Y_3 - Y_E)^2 + (Z_3 - Z_E)^2} \quad (7)$$

$$S_4 = c(\Delta T_4 + \Delta t) = \sqrt{(X_4 - X_E)^2 + (Y_4 - Y_E)^2 + (Z_4 - Z_E)^2} \quad (8)$$

Dies sind die gültigen Gleichungen aller globalen Navigationssatellitensysteme (GNSS). Es können für die Berechnungen auch mehr als vier Satelliten genutzt werden. Hierfür müssen die genannten Gleichungen entsprechend angepasst werden. (Bauer, 2011)

2.6. Die Zeitbestimmung

Wie in den vergangenen Kapiteln beschrieben beruht die Positionsbestimmung auf einer Laufzeitmessung. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die Zeit eine wesentliche Messgröße darstellt. Einerseits sind die Positionen der Satelliten zeitabhängig, andererseits sind auch die Koordinaten von Punkten auf der Erde aufgrund der Erdrotation bei einem astronomischen Koordinatensystem zeitabhängig. (Bauer, 2011)

2.6.1. Die koordinierte Weltzeit - UTC

Bei der koordinierten Weltzeit UTC (Universal Time Coordinated) handelt es sich um eine 1965 eingeführte Zeitmessung, welche die Atomzeit und die UT (Universal Time) kombiniert. Die Universal Time, auch Sonnenzeit genannt, orientiert sich an der Rotation der Erde um sich selbst. Durch 50 astronomische Stationen wird der Sonnenverlauf auf der Erde beobachtet und daraus eine Sonnenzeit gebildet. Dabei wird dem Sonnenhöchststand in Greenwich die Zeit 12.00 Uhr mittags zugeordnet. An dieser Festlegung orientieren sich die Zeitzonen rund um den Globus. Durch die elliptische Flugbahn der Erde um die Sonne sind die Sonnentage nicht gleich lang, was zu Ungenauigkeiten bei der

Zeitmessung führt. Die UT orientiert sich an der mittleren Sonnenzeit am Nullmeridian. (Bauer, 2011)

Für exaktere Zeitmessungen vor allem in der Physik musste eine neue Zeiteinheit geschaffen werden, welche genauer als die, aus der Erdrotation abgeleitete UT, ist. Die genaueste Zeiteinheit, die SI-Sekunde (Système International), wurde 1967 eingeführt. Die SI-Sekunde orientiert sich an atomaren Vorgängen und ist definiert durch (Bauer, 2011, S. 85):

„Die Sekunde ist 9.192.631.770-mal die Periode der ausgesandten Strahlung, die dem Übergang zwischen zwei Hyperfeinenergieniveaus des Grundzustands des Cäsiums 133-Atoms entspricht.“

Diese Zeiteinheit gehört zur Atomzeit (TAI: Temps Atomic International) deren Nullpunkt am 1. Januar 1958 mit der Universal Time übereinstimmte. Aufgrund der verzögerten Erdrotation zeigen sich Abweichungen in der Zeitskala. Diese Abweichung betrug 22,7 s am 01.01.1968. (Bauer, 2011; Mansfeld, 2010)

Wie bereits genannt ist die UTC eine Kombination aus beiden Zeiteinheiten. Sie nutzt das gleiche Skalenmaß wie TAI, also Sekunden. Da die Abweichung zwischen UTC und UT ca. einer Sekunde entspricht, muss diese in festgelegten Zeitabständen durch eine Schaltsekunde angepasst werden. (Bauer, 2011)

2.6.2. Die GNSS-Systemzeit

Die Systemzeit ist eine rechnerische Größe, die sich aus den Beobachtungen von Satelliten und Bodenstationen ableitet. Die Systemzeit ist dabei eine kontinuierliche Zeitskala ohne Sekundensprünge. Jedes GNSS besitzt ein eigenes Zeitsystem mit dazugehörigen Atomuhren. Aufgrund der bekannten Zeitdifferenzen zur UTC können die jeweiligen Zeiten ineinander umgerechnet werden. (Bauer, 2011; Mansfeld, 2010)

2.7. Das Signal

Die Übermittlung von Daten des Satelliten zum Empfänger erfolgt durch elektromagnetische Wellen. Die folgenden Kapitel behandeln die Grundlagen zu elektromagnetischen Wellen, sowie die Signalstruktur und die anschließende Auswertung der Daten.

2.7.1. Die elektromagnetische Welle

Eine periodische Zustandsänderung des elektromagnetischen Felds wird als elektromagnetische Welle bezeichnet. Die Welle setzt sich aus dem Feld zweier senkrechter Vektoren, dem elektrischen und dem magnetischen Vektor, zusammen. Sie kann durch eine Sinusfunktion mit der folgenden Formel beschrieben werden.

$$Y = A \sin \left[2\pi \left(ft - f \frac{X}{v} \right) + \Phi_0 \right] \quad (9)$$

Mit

Y : Größe und Richtung des elektromagnetischen Felds

A : Amplitude (größter Betrag) des Felds der Welle

t : Zeit

f : Frequenz, d.h. Anzahl der Schwingungen in einem festen Punkt in der Zeit t

$$f = \frac{n}{t} = \frac{1}{[Zeit]} \quad (10)$$

X : Entfernung zwischen Sender und Empfänger der Welle

v : Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle

$$v = \lambda f = \frac{\lambda}{T} \quad (11)$$

Φ_0 : Phase der Welle zum Zeitpunkt $t = 0$

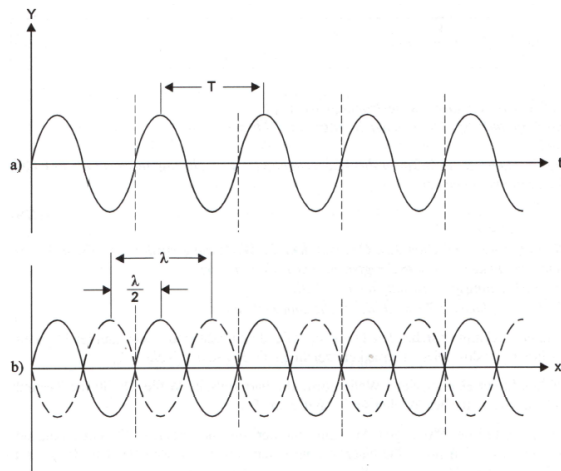


Abbildung 20 (a) Schwingungsdauer und (b) Wellenlänge (Bauer, 2011, S. 88)

Die Schwingungsdauer oder Periode T (Abbildung 20) beschreibt den Zeitabstand zwischen zwei Punkten, die sich im gleichen Schwingungszustand befinden. Der Abstand zweier Orte, die sich in der gleichen Phase befinden, ist die Wellenlänge λ (Abbildung 20). (Bauer, 2011)

2.7.2. Die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit

In der Realität wird nicht eine elektromagnetische Welle mit einer Frequenz übertragen, sondern mehrere Frequenzgruppen mit jeweils vielen Einzelfrequenzen. Die Spanne zwischen der höchsten und der niedrigsten Frequenz einer Gruppe wird Bandbreite genannt. Die Überlagerung vieler einzelnen Frequenzen bildet Energiezentren, die sich mit einer Gruppengeschwindigkeit ausbreiten (Abbildung 21).

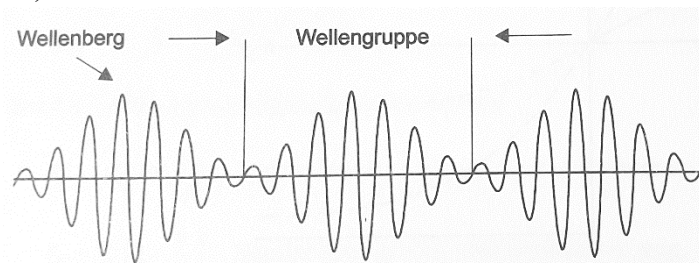


Abbildung 21 Gruppen- und Phasengeschwindigkeit (Bauer, 2011, S. 96)

Die einzelnen Wellen einer Wellengruppe lassen sich durch Gleichung 9 beschreiben. Die Wellenbreite kann durch

$$\frac{1}{\lambda_{\text{Gruppe}}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \right) \quad (12)$$

und die Frequenz durch

$$f_{Gruppe} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \quad (13)$$

berechnet werden.

Durch Kombination der beiden Formeln lässt sich die Geschwindigkeit durch

$$v_{Gruppe} = \lambda_{Gruppe} f_{Gruppe} = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{f_1 - f_2}{2} \quad (14)$$

bestimmen.

Bei einer Unabhängigkeit zwischen Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Phasengeschwindigkeit v_{Phase} gleich der Gruppengeschwindigkeit v_{Gruppe} . Bei einer Abhängigkeit zwischen Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit gilt: $v_{Gruppe} = v_{Phase} - \lambda \frac{dv_{Phase}}{d\lambda}$. (Bauer, 2011)

2.7.3. Der Doppler-Effekt

Wenn sich Sender und Empfänger relativ zueinander bewegen, kommt es zu einer Änderung der Wellenlänge. Dieses Phänomen wird als Doppler-Effekt bezeichnet. Im Alltag kann dies bei Rettungsfahrzeugen erlebt werden. Die Tonhöhe des Martinshorns ist unterschiedlich, je nachdem, ob das Fahrzeug auf einen zu- oder von einem wegfährt. Durch die ständige Bewegung von Satelliten und Empfängern ist der Effekt auch beim GNSS relevant.

Mathematisch lässt sich der Effekt wie folgt beschreiben:

Sender bewegt sich auf Beobachter zu:

$$f_{Empfänger} = f_{Sender} \left(1 + \frac{u}{v}\right) \quad (15)$$

Sender bewegt sich von Beobachter weg:

$$f_{Empfänger} = f_{Sender} \left(1 - \frac{u}{v}\right) \quad (16)$$

Mit

u : Relative Geschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger

v : Ausbreitungsgeschwindigkeit

Die graphische Darstellung (Abbildung 22) zeigt, dass die Frequenzverschiebung abhängig von der Entfernung der Bewegungsbahn zwischen Sender und Empfänger ist.

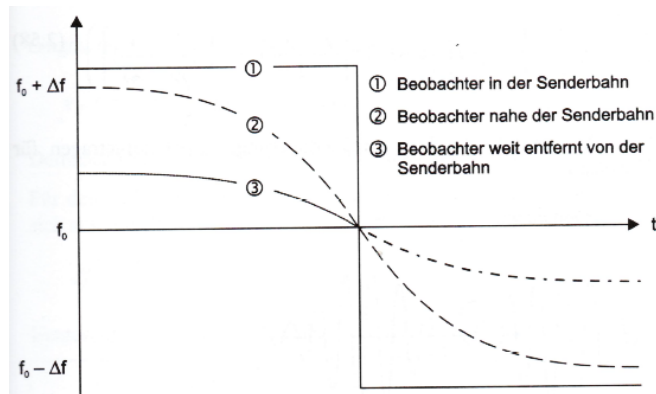


Abbildung 22 Doppler-Kurve (Bauer, 2011, S. 95)

Wenn sich Sender und Empfänger auf derselben Bahn bewegen, kommt es zu einem scharfen Frequenzsprung. Die Treppenform, der scharfe Übergang, gleicht sich mit größerer Entfernung zur Senderbahn einer S-Kurve, einem kontinuierlichen Übergang, an. (Bauer, 2011)

2.7.4. Signalausbreitung in der Erdatmosphäre

Für die Beschreibung der allgemeinen Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen bzw. Wellengruppen ist die Frequenz relevant. In der Realität gibt es verschiedene Frequenzen (Abbildung 23). (Bauer, 2011)

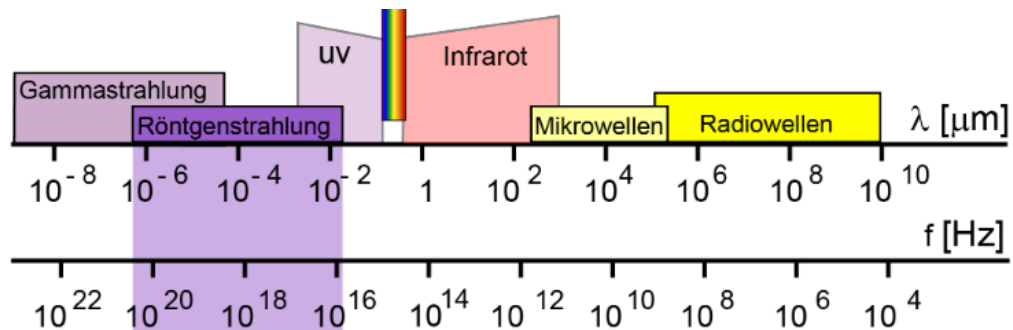


Abbildung 23 Spektrum der elektromagnetischen Wellen (https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/pmed/roe/bilder/wellenspektrum_pasca.png) [abgerufen am 21.04.2023]

Das Verhalten der Welle in der Atmosphäre ist frequenzabhängig, da durch Reibung ein Teil der elektrischen Energie der Welle in Wärme umgewandelt wird. Dies hat zur Folge, dass die Welle gedämpft wird. Das GNSS nutzt für die Kommunikation Wellen im Mikrowellenbereich, da höhere Frequenzen besser für die Signalübertragung geeignet sind. (Bauer, 2011)

Die Atmosphäre kann je nach Temperatur, Ionisation und Gaszusammensetzung in verschiedene Schichten aufgeteilt werden (Abbildung 24).

Höhe	Temperatur	Ionisation	Gaszusammensetzung
über 60.000 km	Interplanetarischer Raum		
über 1.000 km		Protonosphäre	
über 500 km	Exosphäre		Exosphäre
etwa 80 km	Thermosphäre (Mesopause)	Ionosphäre	Heterosphäre
etwa 50 km	Mesosphäre (Stratopause)		
etwa 10 km	Stratosphäre (Tropopause)	Neutrosphäre	Homosphäre
etwa 10 km	Troposphäre		
0 km	Erdoberfläche		

Abbildung 24 Aufbau der Erdatmosphäre (Bauer, 2011, S. 101)

Dabei verändert sich die Geschwindigkeit des Signals in jeder Schicht (ähnlich der Lichtbrechung, z.B. bei einem Plexiglasblock). Diese Ausbreitungsgeschwindigkeit, angepasst auf das Medium, wird durch den Brechungsindex

$$n = \frac{c}{v} = \frac{[\text{Geschwindigkeit des Signals im Vakuum}]}{[\text{Geschwindigkeit des Signals im Medium}]} \quad (17)$$

definiert. (Bauer, 2011)

Vereinfacht muss nur der Einfluss der Ionosphäre und der Troposphäre auf die Welle betrachtet werden (Bauer, 2011).

2.7.4.1. Ionosphärische Refraktion

Durch die ultraviolette Strahlung und die Röntgenstrahlung der Sonne sind die Gasmoleküle der Ionosphäre stark ionisiert. Die Stärke der Ionisierung ist von der Tageszeit sowie dem Ort abhängig. Aufgrund der hohen Elektronendichte N_e entspricht die Signalausbreitung nicht der Lichtgeschwindigkeit. Bei der Ionosphäre handelt es sich um ein dispersives Medium. Dies hat zur Folge, dass es verschiedene Brechungsindexe für die Phasen- und Gruppenbrechung gibt. Dementsprechend ist die Geschwindigkeit (Formel 18 und 19) unterschiedlich. (Bauer, 2011)

$$v_{Phase} = c \cdot \left(1 + \frac{40,3 \cdot N_e}{f^2}\right) \quad (18)$$

$$v_{Gruppe} = c \cdot \left(1 - \frac{40,3 \cdot N_e}{f^2}\right) \quad (19)$$

2.7.4.2. Troposphärische Refraktion

Anders als die Ionosphäre besitzt die Troposphäre nahezu keine freien Elektronen. Die Zusammensetzung besteht aus trockenen Gasen und Wasserdampf. Aufgrund der steigenden Dichte mit abnehmender Höhe kommt es zur Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht gleich der Lichtgeschwindigkeit. Der Brechungsindex für den Mikrowellenbereich kann durch den Partialdruck des Wassers, der Temperatur und dem atmosphärischen Druck berechnet werden. Die Ortsabhängigkeit der drei Größen erschwert eine genaue Bestimmung. (Bauer, 2011)

$$(n - 1) \cdot 10^{-6} = 77,6 \cdot \frac{P}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \cdot \frac{P_W}{T^2} \quad (20)$$

Mit

P_W : Wasserdampfdruck in mbar

T : Temperatur in Kelvin

P : Druck in mbar

2.7.5. Signalstruktur

Satelliten wie zum Beispiel die des NAVSTAR-GPS senden Signale mit einer codierten Impulsfolge. Diese Impulsfolge besteht aus binären Zeichen. Jedem Satelliten wird dabei genau eine spezifische PRN-Impulsfolge (**p**seudo **r**andom **n**oise) zugeordnet. Damit wird eine Unterscheidung der Satelliten durch die Empfangsgeräte ermöglicht. Für die militärische Nutzung wird eine PRN-Impulsfolge mit der Bezeichnung P-Code (**P**recision) genutzt. Für die allgemeine Nutzung wird der C/A-Code (**c**lear/**a**ccess; übersetzt freier Zugang) verwendet. Die spezifische Zuweisung der Codes auf die einzelnen Satelliten ermöglicht es, dass alle Satelliten die gleichen Frequenzen $f_1 = 1575,42 \text{ MHz}$ und $f_2 = 1227,60 \text{ MHz}$ benutzen können. Neben dem eigentlichen Ortungssignal (Zeitangabe für die Laufzeitbestimmung) sendet jeder Satellit eine Navigationsmitteilung, welche unter anderem Parameter für Zeitkorrekturen der Laufzeit bzw. der Satellitenzeit enthält.

Weitere Informationen zum Signalaufbau finden sich bei Mansfeld (2010) Seite 118-144.

2.7.6. Auswertung der Signale

Jeder GPS-Empfänger besitzt eine Antenne mit einem Frequenzverstärker für die Signalauswertung. Das Signal wird im Signalprozessor verarbeitet. Handelsübliche GPS-Geräte besitzen Mehrkanalempfänger, welche eine gleichzeitige Verarbeitung von mehreren Satellitensignalen ermöglichen. Als Minimum werden vier Kanäle für die gleichzeitige Bestimmung der drei Dimensionen und des Zeitfehlers benötigt. Die berechneten Werte können anschließend von weiteren Prozessoren im Gerät weiterverarbeitet werden.

Weitere Informationen zum Signalaufbau finden sich bei Mansfeld (2010) Seite 144-164.

2.8. Aufbau der Satellitensysteme

Jedes GNSS muss drei grundlegende Bausteine besitzen. Es gibt Satelliten, die Signale aussenden, Benutzer, die diese empfangen, und Kontrollstationen zur Satellitenüberwachung. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Segmente vorgestellt.

2.8.1. Das Weltraumsegment - die Satelliten

Für eine exakte Positionsbestimmung muss der Empfänger auf mindestens vier Satelliten gleichzeitig zugreifen können. Dies soll für jedes Empfangsgerät, unabhängig seiner Position auf der Welt, erreicht werden. Die Voraussetzungen hierfür werden im Folgenden beschrieben.

2.8.1.1. Die Keplerschen Gesetze

Als Grundlage für die Berechnung von Satellitenbahnen um die Erde dienen die Keplerschen Gesetze. Diese lauten angepasst auf den Satelliten und die Erde:

1. Die Bahn eines Satelliten ist eine Ellipse, in deren Brennpunkt sich das Geozentrum (Masseschwerpunkt der Erde) befindet.
2. Die Verbindungslinie Geozentrum-Satellit überstreicht in gleicher Zeit gleiche Flächen.

3. Das Quadrat der Umlaufzeit eines Satelliten ist proportional zur dritten Potenz der großen Achse der Bahnellipse.

(Bauer, 2011, S. 55)

2.8.1.2. Die Satellitenposition

Aufgrund der oben genannten Gesetze kann, sofern die Ellipsenparameter und die Position des Satelliten zum Zeitpunkt T_0 bekannt sind, die Position der Satelliten zu einem bestimmten Zeitpunkt t berechnet werden. Abbildung 25 zeigt eine Modellierung einer Satellitenbahn. Dabei werden neben der großen Halbachse a und der kleinen Halbachse b weitere Parameter relevant:

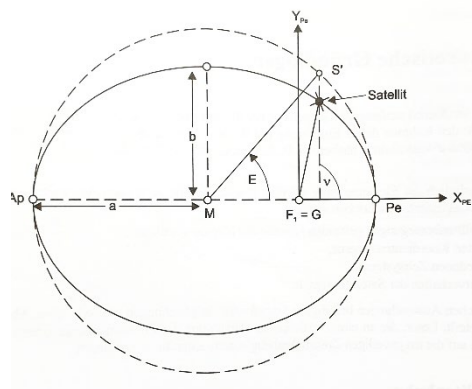


Abbildung 25 Ellipse als Satellitenbahn (Bauer, 2011, S. 56)

Perigäum Pe :	Erdnächster Punkt der Ellipsenbahn
Apogäum Ap :	Erdfernster Punkt der Ellipsenbahn
Apsidenlinie:	Verbindungslinie $Pe - Ap$
Numerische Exzentrizität e :	$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$
Exzentrische Anomalie E :	Winkel $Pe - M - S'$ S' ist die Projektion des Satelliten auf den Scheitelkreis der Ellipse
Wahre Anomalie v :	Winkel $Pe - G - S$ S ist die Position des Satelliten
Radiusvektor r :	Strecke $G - S$
M :	Mittelpunkt der Ellipsenbahn
G :	Geozentrum der Erde

Neben der Geometrie der Satellitenbahn muss diese ebenfalls im Raum beschrieben werden (Abbildung 26).

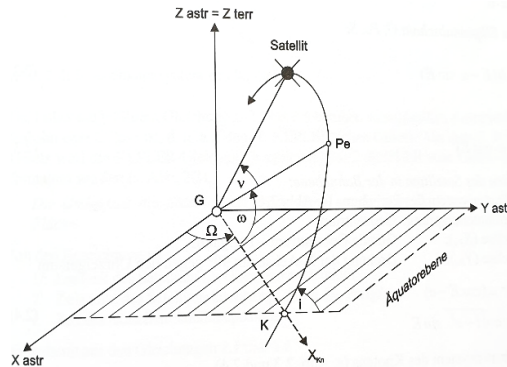


Abbildung 26 räumliche Festlegung der Satellitenbahn (Bauer, 2011, S. 57)

Dafür wird zunächst ein Koordinatensystem (ECEF) benötigt sowie die folgenden Parameter:

- | | |
|--|---|
| Aufsteigender Knoten K : | Punkt der Bahnellipse, in dem der Satellit die Äquatorebene von Süden nach Norden durchstößt |
| Rektaszension des aufsteigenden Knotens Ω : | Winkel zwischen der X -Achse des astronomischen Koordinatensystems und der Verbindungslinie Geozentrum – aufsteigender Knoten |
| Argument des Perigäums ω : | Winkel $K - G - Pe$ |
| Bahnneigung i : | Winkel zwischen der Äquatorebene und der Ebene der Ellipsenbahn |

(Bauer, 2011, S. 55)

In der Praxis handelt es sich um gestörte-Keplerellipsen, was bei der Berechnung der Position des Satelliten problematisch sein kann. Gründe hierfür sind:

- Der direkte und indirekte Strahlungsdruck der Sonne beeinflusst die Satellitenbahn zu jeder Zeit, in der der Satellit nicht durch den Erdschatten geschützt ist.
- Die Annahme, dass die Erde eine Kugel mit einer gleichmäßig verteilten Dichte sei, sorgt dafür, dass die Satellitenbahnen nur annäherungsweise Ellipsen sind.
- Die Schwerefelder von Sonne und Mond sorgen für Störungen der Satellitenbahn, wobei der Einfluss des Mondes durch seine Nähe

zum Satelliten um ein Vielfaches größer ist.

- Die Restatmosphäre der Erde sorgt für Reibungskräfte, die die Satellitenbahnen ebenfalls beeinflussen.

(Bauer, 2011)

2.8.1.3. Die Satellitenkonstellationen

Um eine flächendeckende Versorgung der Empfänger mit mindestens vier verschiedenen Satelliten sicherzustellen, müssen die Satelliten in einer bestimmten Konstellation um die Erde verteilt sein. Folgende Aspekte spielen dabei eine Rolle:

- Große Bahnhöhen haben gegenüber kleineren Bahnhöhen den Vorzug, dass die Anzahl der benötigten Satelliten geringer ist.
- Geneigte Bahnen haben gegenüber Polbahnen den Vorzug, dass einerseits polnahe Gebiete beobachtet werden können und andererseits unnötige Satellitenhäufungen an den Polen vermieden werden.
- Gleichverteilung der Satelliten erlaubt eine komplette Überdeckung bei minimalem Aufwand und hat zugleich den Vorzug, dass mögliche Satellitenkontakte gut überschaubar bleiben.
- Symmetrie der Satellitenbahnen bewirkt, dass im Mittel auf alle Satelliten die gleichen Störfaktoren wirken, sodass die Konstellation relativ stabil ist.

(Bauer, 2011, S. 165)

Für eine weltweite Abdeckung benötigt das Weltraumsegment mindestens 24 Satelliten. Das Galileo-System besitzt zusätzlich noch 6 Reservesatelliten, die sich auf einer Höhe von 23616 km im mittleren Erdorbit bewegen (Mansfeld, 2010, S. 248). Die Satelliten sind auf drei Bahnen, mit jeweils zehn Satelliten, verteilt. Die Bahnen sind um 56° in Bezug zur Äquatorebene geneigt (Abbildung 27).

Beim amerikanischen NAVSTAR-GPS sind 24 Satelliten auf sechs Bahnen verteilt (Abbildung 28). Die Bahnen sind um 55° gegenüber dem Äquator geneigt (Mansfeld, 2010, S. 112).

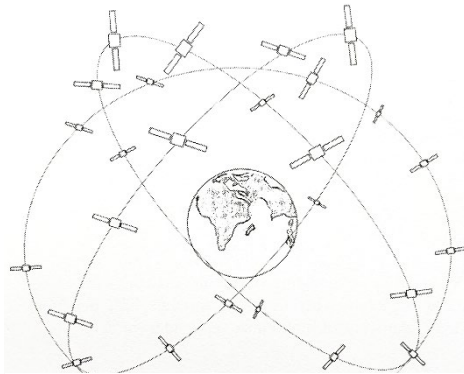


Abbildung 27 Umlaufbahnen der Galileo-Satelliten (Mansfeld, 2010, S. 247)

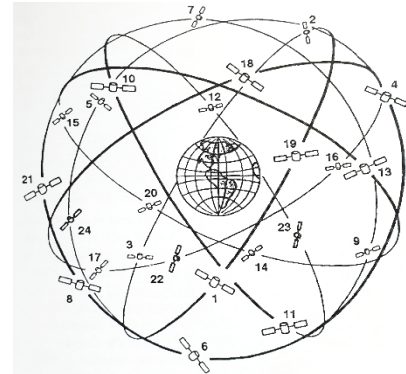


Abbildung 28 Umlaufbahnen der NAVSTAR-Satelliten (Mansfeld, 2010, S. 110)

2.8.1.4. Aufbau der Satelliten

Alle GNSS-Satelliten besitzen den gleichen Grundaufbau. Große Solarkollektoren sichern die Stromversorgung und Triebwerke ermöglichen eventuelle Kurskorrekturen. Zum Senden und Empfangen der Signale besitzt der Satellit verschiedene Antennen. Die Galileo-Satelliten nutzen für eine genaue Zeitmessung vier Atomuhren, von denen zwei Wasserstoffmaser-Uhren die Systemzeit bestimmen und zwei Rubidium-Uhren als Backup dienen. (Galileo Satellites, 2023)



Abbildung 29 Galileo-Satellit (https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2000/10/galileo_satellite2/9235665-5-eng-GB/Galileo_satellite_pillars.jpg) [abgerufen am 02.04.2023]

2.8.1.5. Relativistische Effekte

Aufgrund der großen Flughöhen und hohen Geschwindigkeiten, mit der sich Satelliten durchs Weltall bewegen, gibt es Effekte der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie auf die Satellitenuhren. (Schüttler, 2018)

Die hohe Geschwindigkeit der Satelliten relativ zu einem Beobachter auf der Erdoberfläche sorgt dafür, dass die Zeit des Satelliten nach den Gesetzen der speziellen Relativitätstheorie langsamer vergeht als bei einer in Ruhe befindlichen Uhr auf der Erde. Dies bedeutet, dass die bewegte Uhr eine kleinere Schwingungsfrequenz (geht langsamer) besitzt als die ruhende Uhr. Dabei muss es sich bei dem Bezugssystem um ein Inertialsystem handeln (Abbildung 30). (Schüttler, 2018)

Die verschiedenen Kräfte, wie z.B. die Gravitationskraft der Erde, auf den Satelliten sorgen dafür, dass es sich nicht mehr um ein Inertialsystem handelt. Somit gilt die allgemeine Relativitätstheorie, die besagt, dass Uhren in einem höheren Gravitationspotenzial langsamer gehen als Uhren in einem niedrigeren Gravitationspotenzial. Die Uhr des Satelliten geht somit schneller (höhere Frequenz) als eine Uhr auf der Erdoberfläche (Abbildung 30). (Schüttler, 2018)

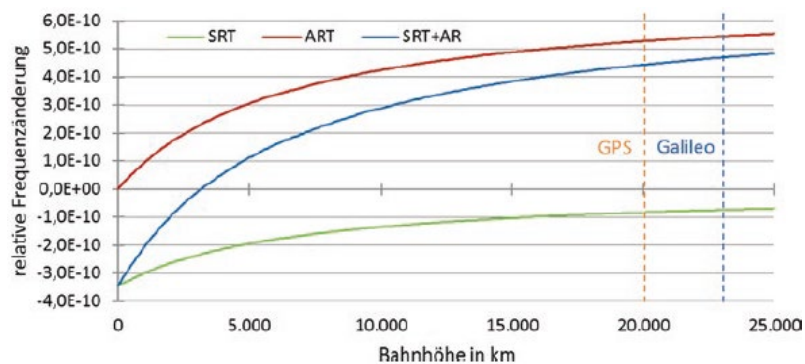


Abbildung 30 Einfluss der allgemeinen und der speziellen Relativitätstheorie auf Satellitenuhren (Schüttler, 2018, S. 28)

Beide Effekte zusammen heben sich jedoch nicht gegenseitig auf (Abbildung 30). Satelliten werden somit vor dem Start relativistisch korrigiert (Schüttler, 2018).

2.8.2. Das Kontrollsegment – die Bodenstationen

Die Aufgabe des Kontrollsegments ist es, die Satellitenuhrzeiten und Satellitenbewegungen zu beobachten sowie die Funktion des gesamten Systems zu kontrollieren. Bei Galileo bilden zwei Zentren in Deutschland und Italien den Kern des Kontrollsegments. Die Hauptbereiche werden unterteilt in das Ground Control Segment und das Ground Mission Segment. Für das Ground Control Segment stehen fünf global verteilte Satelliten-Kontrollstationen zur Verfügung, welche den Zustand der Satelliten überwachen und bei Bedarf Kommandos senden können. Das Ground Mission Segment überwacht die Integrität der empfangenen Signale. Ebenso gleicht es die Borduhren ab und berechnet eine Vorhersage der Bahnverläufe für die nächsten Stunden. Die Daten hierfür stammen aus einem Netzwerk von 40 Galileo Sensor Stationen. (*Die Architektur Des Galileo-Systems*, 2023; Bauer, 2011; Mansfeld, 2010)

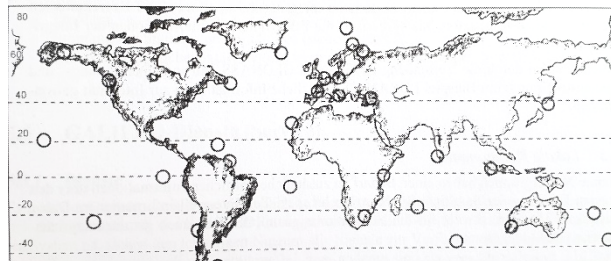


Abbildung 31 Verteilung der Stationen des Bodensegmentes von Galileo (Mansfeld, 2010, S. 250)

Die Kontrollstation des amerikanischen Ortungssystem NAVSTAR-GPS liegt in der Nähe von Colorado Springs (Colorado, USA). Die fünf Satelliten-Kontrollstationen sind weltweit verteilt, um zu jedem Satelliten maximal drei Kontakte pro Tag zu ermöglichen. Die Standorte befinden sich in Hawaii, Ascension Islands (südlicher Atlantik), Diego Garcia (Indischer Ozean), Kwajalein (Pazifischer Ozean) sowie an der Hauptkontrollstation. (Mansfeld, 2010)

2.8.3. Das Benutzersegment

Das Nutzersegment besteht aus militärischen sowie zivilen Nutzern. Dabei ist die Zahl der zivilen Nutzer um ein Vielfaches größer als die der militärischen. Sämtliche Nutzer können nach Art der genutzten Informationen bzw. nach Genauigkeitskriterien unterteilt werden. Informationen zur Position werden z.B. neben der Navigation auch bei Vermessungen von Gebäuden, Feldern oder

Landmassen genutzt. Informationen zur Geschwindigkeit werden für die Überwachung und Steuerung von Bewegungen z.B. im Schiffs- und Flugverkehr benötigt. Die Zeitinformationen dienen unter anderem der Synchronisation von Informationsübertragungen. (Mansfeld, 2010)

Die Aufteilung der Genauigkeitskriterien lässt sich dabei unterteilen in statische Ortung: Vermessung von Bauwerken (typische Fehlergrößen zwischen 0,1 m und 1 m) oder Kartenaufnahmen (typische Fehlergrößen zwischen 0,5 m und 5 m) sowie in dynamische Ortung: Navigation bei Schiffen und Flugzeugen. Dabei ist der maximale Positionsfehler von der Situation abhängig. Zum Beispiel müssen die Angaben auf offener See weniger genau sein als im Küsten- oder Hafenbereich. (Mansfeld, 2010)

2.9. Mögliche Fehlerquellen

In den vorausgegangenen Abschnitten wurden einige Fehlergrößen wie z.B. die Brechung des Signals innerhalb der Atmosphäre beschrieben. Nachfolgend soll auf weitere Fehlergrößen eingegangen werden.

2.9.1. Fehler bei der Messung der Pseudoentfernung

Der Ursprung von Fehlern bei der Entfernungsmessung könnte bereits bei den Satelliten, dem Übertragungsweg oder den Empfangsstationen liegen.

Mögliche Fehlerquellen der Satelliten sind die Bahndaten und die Uhren. Aufgrund der ständigen Überwachung der Satelliten durch die Boden- und Kontrollstationen werden die Bahndaten angepasst, sodass der daraus resultierende Fehler auf die Position weniger als einen Meter beträgt. Ebenso wird die Zeit überwacht, sodass die Systemzeit gegenüber der UTC um $1 \mu\text{s}$ konstant gehalten wird. Die Uhren in den Satelliten laufen des Weiteren so genau, dass die Effekte der Relativität berücksichtigt werden müssen (Kapitel 2.8.1.5). (Mansfeld, 2010)

In den Kapiteln 2.7.4.1 und 2.7.4.2 wurden bereits zwei Fehlerquellen der Signalausbreitung, die ionosphärische und die troposphärische Refraktion, beschrieben, deren Messfehler sich zwischen 3 m und 15 m bewegen. Durch

Nutzung von Korrekturmodellen kann der Fehler der troposphärischen Refraktion auf 1 m reduziert werden (Mansfeld, 2010).

Weitere Informationen zu den Korrekturmodellen finden sich bei Bauer (2011) Seite 112.

Durch Mehrwegeausbreitung und Signalbeugung entstehen weitere Fehler. Mehrwegeausbreitung beschreibt den Fall, dass das Signal nicht auf direktem Weg vom Sender zum Empfänger verläuft, sondern indirekt durch Reflexionen an Objekten den Empfänger erreicht

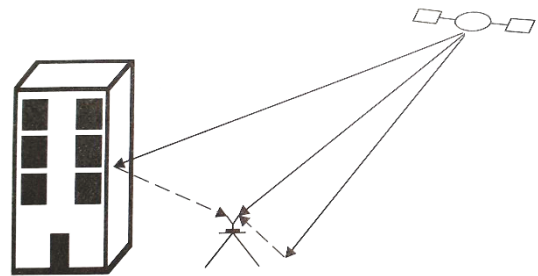


Abbildung 32 Mehrwegeausbreitung (Bauer, 2011, S. 114)

(Abbildung 32). Die Mehrwegeausbreitung kann dazu führen, dass Entfernungfehler von 1 m bis 100 m auftreten können, was eine Nutzung des GNSS in Städten aufgrund der engen und teils hohen Bebauung stark einschränkt. Durch einen Vergleich der Zeitunterschiede der eintreffenden direkten und indirekten Signale mit Taktfrequenz des C/A-Codes können mögliche Fehler reduziert werden, wenn die Leistung der indirekten Welle mindestens 3 dB unter der direkten Welle liegt (Mansfeld, 2010).

Empfänger, die sich hinter Objekten befinden, können indirekte Signale aufgrund der Signalbeugung (Abbildung 33) empfangen. In diesem Fall kommt es jedoch nicht zu einer Überlagerung von mehreren Signalen, da nur das indirekte Signal den Empfänger erreichen kann. Wegen der längeren Laufzeit kommt es zu Ungenauigkeiten. Ebenso können mögliche Fehler bei der Positionsbestimmung von einem statischen Punkt durch zunehmende Beobachtungsdauer vermindert werden. (Bauer, 2011; Mansfeld, 2010)

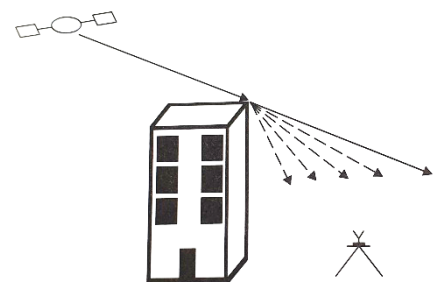


Abbildung 33 Signalbeugung (Bauer, 2011, S. 116)

Fehlerquellen der Empfangsstationen können zu Messrauschen und Ungenauigkeiten bei der Verarbeitung der Signale führen. Diese liegen im Millimeter-

Bereich und werden somit nur bei sehr genauen Messungen berücksichtigt. (Mansfeld, 2010)

2.9.2. Fehler durch äußere Einflüsse

Durch die niedrige Empfängerleistung von $1 \cdot 10^{-16} W$ kann es zu Interferenzen mit hochfrequenten Signalen kommen. Diese Signale führen zu Problemen beim Erfassen des eigentlichen Signals, was zu Messfehlern oder auch zur Unbrauchbarkeit des Systems führen kann. Gründe hierfür können verschieden sein (Abbildung 90 im Anhang I). (Mansfeld, 2010)

2.9.3. Fehler der Position durch geometrische Verhältnisse

Der Standort wird durch den Schnittpunkt von mehreren Bezugspunkten gebildet (Erläuterungen hierzu in Kapitel 2.5). Die Abbildungen 34 und 35 verdeutlichen den geometrisch bedingten Positionsfehler.

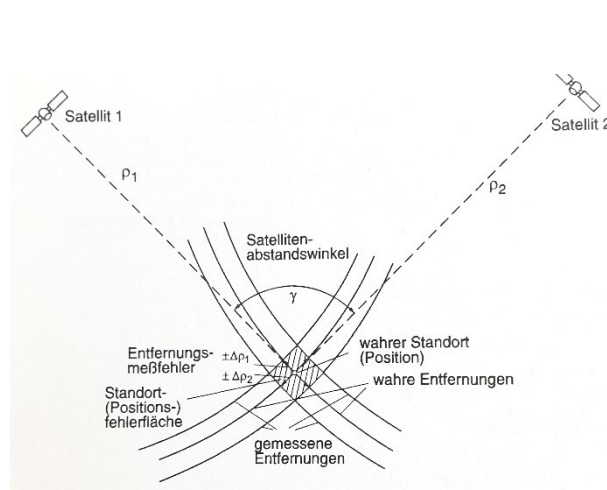


Abbildung 34 Positionsfehler und Flächenfehler bei der Standortbestimmung mit zwei Entfernungen ρ_1 und ρ_2 sowie einem Satellitenwinkel von $\gamma = 90^\circ$ (Mansfeld, 2010, S. 183)

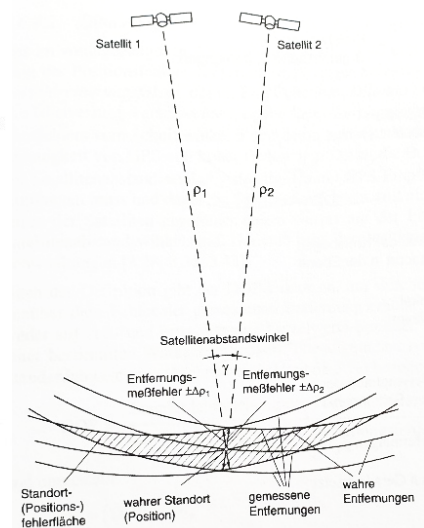


Abbildung 35 Positionsfehler und Flächenfehler bei der Standortbestimmung mit zwei Entfernungen ρ_1 und ρ_2 sowie einem Satellitenwinkel von $\gamma = 15^\circ$ (Mansfeld, 2010, S. 184)

Für eine hohe Genauigkeit muss das aufgespannte Volumen der Satelliten möglichst groß sein. Durch Verschiebung der Satelliten verändert sich der Schnittwinkel, welcher zu einer Änderung der Fehlerfläche führt. Der Positionsfehler ist am geringsten bei einem Winkel $\gamma = 90^\circ$ (Abbildung 34) und nimmt bei kleiner werdendem Winkel zu (Abbildung 35). (Mansfeld, 2010)

3. Anwendung im Physikunterricht

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie das Smartphone als GPS-Empfänger im Physikunterricht eingesetzt werden kann. Um einen Erkenntnisgewinn für Schülerinnen und Schüler im Unterricht durch Experimente mit digitalen Medien zu erzielen, ist eine intensive Auseinandersetzung der Lehrkraft mit den technischen Einsatzmöglichkeiten und deren Grenzen notwendig.

Im Zuge dessen werden in Kapitel 3.2. verschiedene Apps und Programme zum Sammeln von Daten verglichen. Anschließend werden in Kapitel 3.3. zunächst Möglichkeiten und eventuelle Schwierigkeiten bei der Datenauswertung und -darstellung vorgestellt, bevor in Kapitel 3.4. auf realisierbare Experimente eingegangen wird.

3.1. Gründe für GPS im Physikunterricht

Das Ziel der naturwissenschaftlichen Bildung geht über das pragmatische Anwenden von Wissen hinaus. Schülerinnen und Schüler sollen neben den verschiedenen Wissensarten und Kompetenzen weitere Komponenten wie Interesse, Motivation und Einstellungen gegenüber den Naturwissenschaften entwickeln (Hessisches Kultusministerium, 2023a).

Physikalische Grundlagen sollen dabei den Schülerinnen und Schülern an authentischen Beispielen nahegebracht werden. Dies ermöglicht es den Schülerinnen und Schülern Probleme und Sachverhalte durch selbstständiges Experimentieren zu überprüfen und sich so mit ihrer Umwelt auseinanderzusetzen (Hessisches Kultusministerium, 2023a). In der gymnasialen Oberstufe sollen die Schülerinnen und Schüler zunehmend vom geleiteten Lernen in der Sekundarstufe I zum selbstständigen und eigenverantwortlichen Lernen geführt werden, um sie bestmöglich auf ein Studium an einer Hochschule vorzubereiten (Hessisches Kultusministerium, 2023b).

Das hessische Kerncurriculum beschreibt Kompetenzen, die die Schülerinnen und Schüler zu bestimmten Zeitpunkten in ihrer Schullaufbahn besitzen sollen. Die Lernkompetenz als überfachliche Kompetenz befähigt Schülerinnen und

Schüler Probleme selbstständig zu lösen sowie neue Medien für die Erschließung und Dokumentation von Ergebnissen zu nutzen. Im Bereich der fachlichen Kompetenzen werden der Erkenntnisgewinnung durch Beobachten, Beschreiben, Vergleichen sowie Planen, Untersuchen, Auswerten und Interpretieren von physikalischen Vorgängen in der Umwelt Raum gegeben. Hierbei sollen die Schülerinnen und Schüler die Sachverhalte unter Verwendung von korrekter Fach- und Symbolsprache kommunizieren. (Hessisches Kultusministerium, 2023a)

Obwohl GPS-Empfänger im privaten Gebrauch seit Jahren verwendet werden und Schülerinnen und Schüler im Alltag bereits Erfahrungen im Umgang mit z.B. Navigationsgeräten im Auto sammeln konnten, finden diese Hilfsmittel im schulischen Kontext bisher kaum Anwendung. Im Zuge der Digitalisierung sind an vielen Schulen iPad-Koffer mit Geräten im Klassensatz vorhanden bzw. gibt es spezielle iPad-Klassen, in denen diese Geräte vielfältig im Unterricht genutzt werden. Zahlreiche Schülerinnen und Schüler nutzen technologisch fortschrittliche Smartphones mit integrierten GPS-Empfängern, welche eine Nutzung auch in der Schule im Rahmen von Experimenten ermöglichen. Wenn einzelne Schülerinnen und Schüler kein eigenes Smartphone besitzen, fördert das Experimentieren in Gruppen die Kommunikation und verbindet Erkenntnisgewinnung und soziales Lernen miteinander.

Die Schülerinnen und Schüler haben die Möglichkeit, verschiedene Bewegungen selbst zu erfahren, um die dahinterstehenden physikalischen Sachverhalte sowohl qualitativ als auch quantitativ zu erarbeiten. Verschiedene Schülerfehlvorstellungen in der Kinematik werden aufgezeigt, sodass diese im Unterricht reflektiert werden können.

3.2. Verschiedene GPS-Tracker für Smartphones im Vergleich

Für die Aufzeichnung der Bewegungen benötigen die Schülerinnen und Schüler ihr Smartphone bzw. ein Tablet mit einer entsprechend installierten App. Es gibt für die jeweiligen Plattformen (Betriebssysteme) spezifische Apps. Da die Schülerinnen und Schüler Smartphones unterschiedlicher Hersteller besitzen, werden im Folgenden verschiedene kostenfreie Apps mit ihren jeweiligen Vor- und

Nachteilen vorgestellt. Hierfür wurden die Apps auf einem iPhone 6 (IOS), Samsung Galaxy S9+ (Android) bzw. iPad 8. Generation (IOS) getestet. Während auffiel, dass die Messdaten des iPads ungenauer waren als die Messungen mit den Smartphones, sind diese Geräte aufgrund ihrer Größe ebenfalls eher ungeeignet für Aufzeichnungen von z.B. Sprints. Neben den aufgeführten Apps gibt es noch weitere, wie z.B. Sporttracker für Joggen und Fahrradfahren, die den Standort und die Bewegung aufzeichnen. Die Daten können hier jedoch nur durch Hinzunahme von kostenpflichtigen Apps exportiert werden.

Bei der Verwendung von anderen Apps sollte besonders darauf geachtet werden, dass bei den Einstellungen die Genauigkeit möglichst hoch ist.

<i>Name der App</i>	Vorteile	Nachteile
<i>phyphox</i>	+ verfügbar für beide Plattformen + bietet weitere Messmöglichkeiten für andere physikalische Experimente	– Export nicht als .gpx-Datei möglich – keine Einstellungsmöglichkeiten – Gerät darf während der Aufzeichnung nicht gesperrt werden
<i>Komoot</i>	+ verfügbar für beide Plattformen + Export als .gpx-Datei	– keine Einstellungsmöglichkeiten – Datenexport umständlich
<i>Geo-Tracker</i>	+ Export in verschiedene Dateiformate möglich + übersichtliche Oberfläche + viele Aufzeichnungseinstellungen	– Android exklusiv
<i>GPX-Tracker</i>	+ keine Werbung und keine InApp-Käufe + einfache Oberfläche + Export als .gpx-Datei	– IOS exklusiv – Datenexport umständlich

GPS-Tracker	<ul style="list-style-type: none"> + Möglichkeit mehrere Aufnahmen vor Beginn der Messung zu erstellen und einzustellen + Export in verschiedene Dateiformate möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - IOS exklusiv - Einstellungen müssen für jede Aufnahme einzeln geändert werden
GPS-Tracks	<ul style="list-style-type: none"> + Anzeigemöglichkeit der Aufnahme in einer Karte 	<ul style="list-style-type: none"> - IOS exklusiv - Export der Daten nur in der PRO-Version (Aufpreis) möglich

3.2.1. phyphox (Android und IOS)

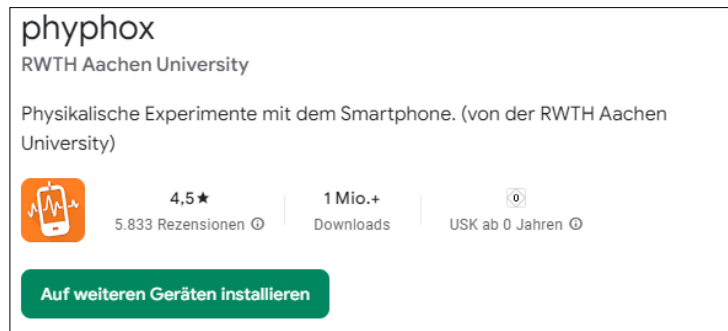


Abbildung 36 Screenshot der phyphox-Ansicht aus dem Google Play Store (https://play.google.com/store/apps/details?id=de.rwth_aachen.phyphox&hl=de) [abgerufen am 11.04.2023]

Bei *phyphox* handelt es sich um eine sehr umfassende App, die auf Smartphones und Tablets im Physikunterricht nicht fehlen sollte. Die App gibt es für beide Plattformen, die Oberfläche ist übersichtlich und die Steuerung intuitiv. Neben der Möglichkeit, Standortdaten zu empfangen, kann die App auch für weitere Sensordaten genutzt werden (z.B. Beschleunigungen aus dem Beschleunigungssensor, Lichtdaten, Daten zum Magnetfeld und Informationen zum Luftdruck).

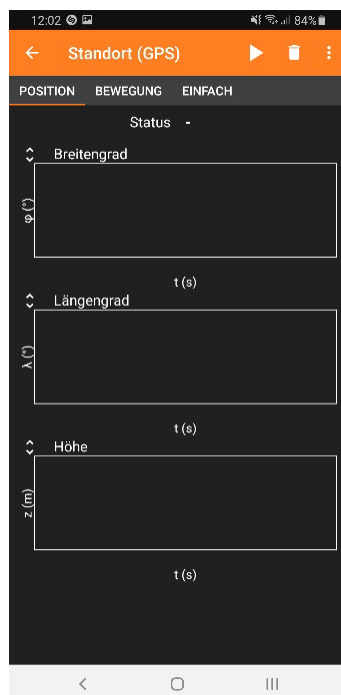


Abbildung 38 Ansicht während der Messung in *phyphox*

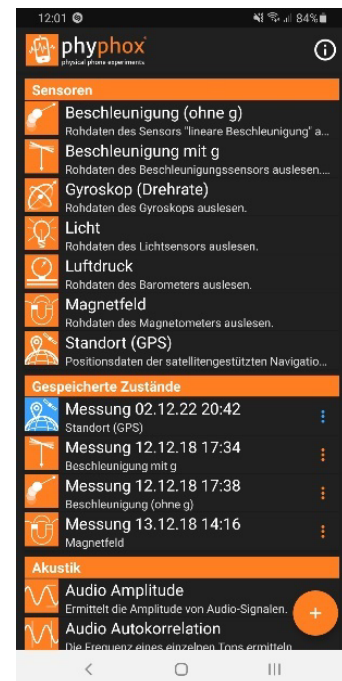


Abbildung 37 Übersicht in *phyphox*

Um GPS-Daten aufzunehmen, kann die Messung immer über den Play-Button gestartet

werden. Während der Messung darf das Gerät im Vergleich zu anderen Apps nicht gesperrt werden. Im oberen Bereich des Bildschirms kann direkt zwischen verschiedenen Übersichten gewechselt werden.

Während und nach Beendigung der Messung werden die Messkurven zur Geschwindigkeit und zur Strecke bereits in der App angezeigt. Der Datenexport erfolgt über die drei Punkte oben rechts am Bildschirm. Bei den exportierten Daten handelt es

sich nicht um eine .gpx-Datei, sondern um ein *Excel* Dokument. Dieses kann nicht online oder in *Google Earth* angezeigt werden. Die Datei beinhaltet neben Längen und Breitengraden auch die Anzahl der verwendeten Satelliten, sowie eine berechnete Geschwindigkeit. Die Zeit zu den einzelnen Messpunkten wird nicht durch die tatsächliche Uhrzeit angegeben, sondern beginnt bei null mit Start der Messung. Aus diesem Grund sollte für die Auswertung mit *Excel* die extra auf diese App angepasste Datei gewählt werden.

3.2.2. Komoot (Android und IOS)

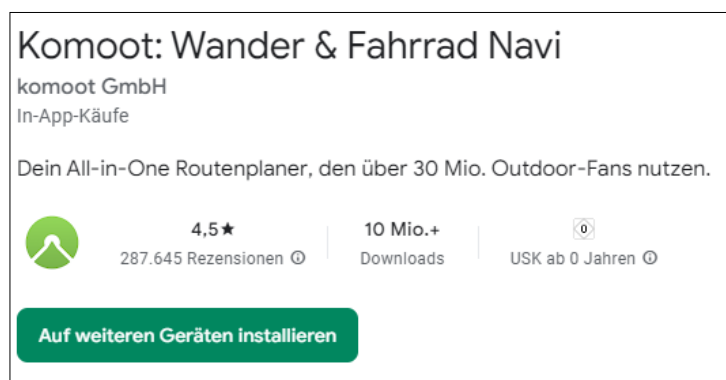


Abbildung 39 Screenshot der Komoot-Ansicht aus dem Google Play Store (<https://play.google.com/store/apps/details?id=de.komoot.android&hl=de>) [abgerufen am 11.04.2023]

Bei *Komoot* handelt es sich um eine Outdoor-App für Wandernde und Radfahrende. Für die Nutzung muss ein kostenloser Account erstellt werden. Im Anschluss zeigt die App verschiedene Routen von anderen Nutzern und Nutzerinnen.

Neben der Möglichkeit Routen im Routenplaner zu erstellen, können diese auch live aufgenommen werden. Die Aufnahme wird in der Mitte unten am Bildschirm gestartet. Einstellungsmöglichkeiten zur Genauigkeit werden nur durch die Wahl der Sportart ermöglicht.

Im Anschluss kann die Aufnahme über das persönliche Profil abgerufen werden. Die Durchschnittsgeschwindigkeit sowie ein Höhenprofil der

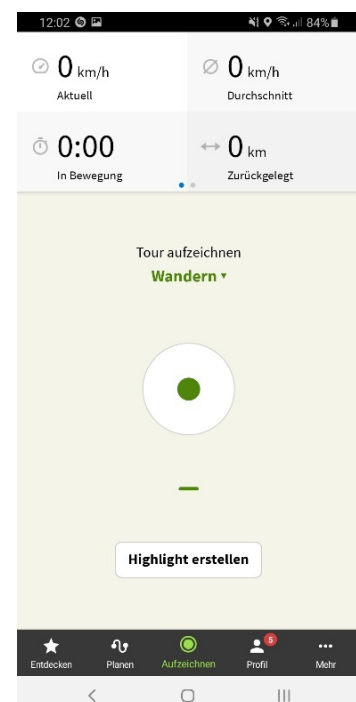


Abbildung 40 Übersicht der Komoot App

Aufnahme werden angezeigt. Über die drei Punkte oben rechts am Bildschirm kann die Aufnahme als .gpx-Datei exportiert werden.

3.2.3. Geo-Tracker (Android)

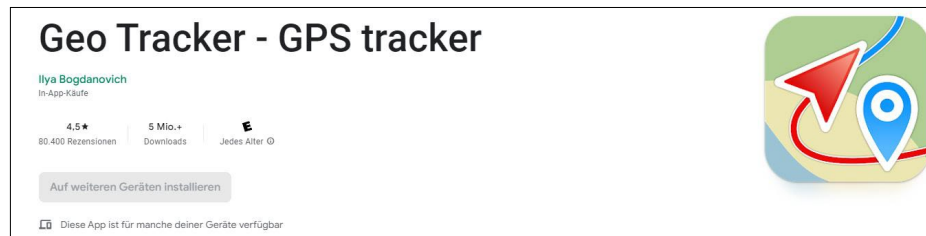


Abbildung 41 Screenshot der Geo-Tracker-Ansicht aus dem Google Play Store (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ilyabogdanovich.geotracker&hl=de&gl=US&pli=1>) [abgerufen am 21.03.2023]

Die Android App *Geo-Tracker* ist sehr übersichtlich gestaltet und einfach zu bedienen. Darüber hinaus bietet sie die Möglichkeit aufgenommene Routen im .gpx Format zu exportieren. Die Aufzeichnung können über den roten Button unten rechts am Bildschirm gestartet werden. Während der Messung werden im unteren Bereich unter anderem die Anzahl der Satelliten, sowie die Geschwindigkeit, Messdauer und die zurückgelegte Strecke angezeigt. Über die Funktion „Statistik“ können bereits während der Aufnahme Details wie z.B. die zurückgelegte Strecke, die maximale Geschwindigkeit oder auch ein t-v-Diagramm angezeigt werden.

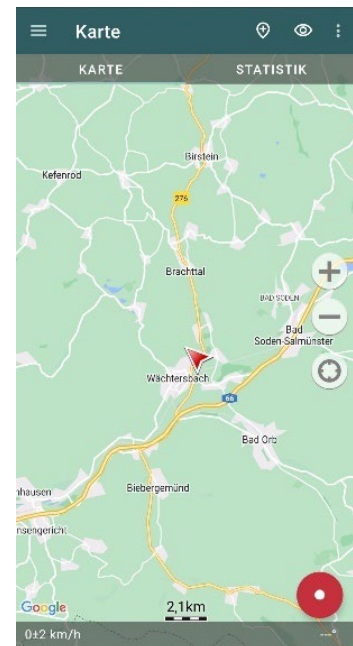


Abbildung 42 Übersicht der Geo-Tracker App

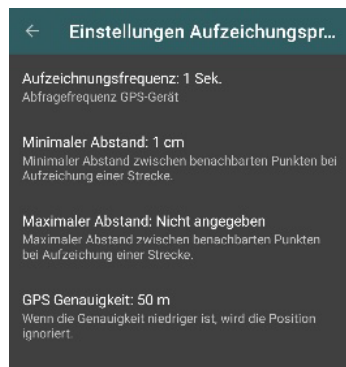


Abbildung 43 Einstellungsprofil der Aufzeichnung bei Geo-Tracker

Über die drei senkrechten Punkte am oberen rechten Bildschirm können die Einstellungen aufgerufen und gegebenenfalls angepasst werden. Die Aufzeichnungseinstellungen sollten auf „genau“ gestellt sein, sodass in jeder Sekunde ein neuer Wegpunkt aufgezeichnet wird. Der minimale Abstand zwischen den Positionspunkten sollte sehr gering gewählt werden, da sonst bei schlechtem GPS-Empfang einzelne Punkte nicht aufgezeichnet bzw. übersprungen werden. Der

maximale Abstand sollte nicht angegeben werden, sodass die Messung bei einem fehlenden Punkt nicht automatisch abgebrochen wird. Diese Einstellungen können bei Bedarf auf die jeweilige Messung angepasst werden.

Über die drei waagerechten Linien oben links am Bildschirm (Abbildung 42) können die einzelnen Aufnahmen angezeigt und als .gpx Datei heruntergeladen bzw. exportieren werden. Über den Kreis rechts am Bildschirm kann in einer bestehenden Datei die Streckenaufzeichnung fortgesetzt werden.



Abbildung 44 Übersicht und Export der aufgezeichneten Routen im Geo-Tracker

3.2.4. GPX-Tracker (IOS)

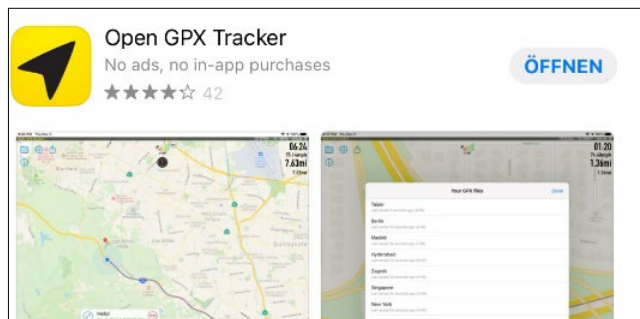


Abbildung 45 Screenshot von GPX-Tracker aus dem App Store (<https://apps.apple.com/de/app/open-gpx-tracker/id984503772>) [abgerufen am 11.04.2023]

Beim *GPX-Tracker* finden sich alle relevanten Funktionen direkt auf dem Bildschirm. Ein Ordner mit bereits erstellten Messungen sowie die Einstellungs- und Exportmöglichkeiten befinden sich oben links am Bildschirm. Anders als beim *Geo-Tracker* wird die Genauigkeit über die zu wählenden Aktivitätstypen festgelegt. Die App zeigt während der Messung den Streckenverlauf auf dem Bildschirm an sowie einige zusätzliche Daten in der rechten oberen Ecke.

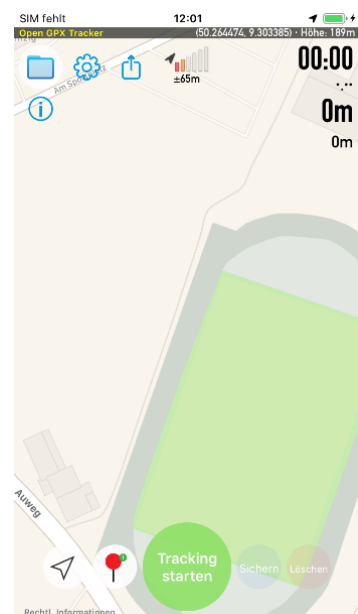


Abbildung 46 Übersicht im GPX-Tracker

Der Datenexport ist umständlich, da jede Messung manuell auf dem Gerät gespeichert werden muss und nicht als Paket direkt versendet werden kann.

3.2.5. GPS-Tracker (IOS)

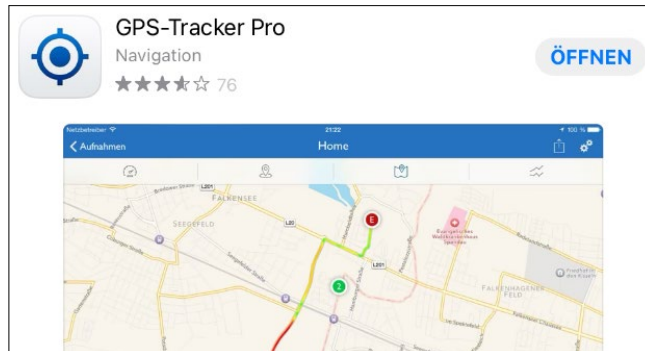


Abbildung 47 Screenshot von GPS-Tracker aus dem App Store (<https://apps.apple.com/de/app/gps-tracker-pro/id984920064> [abgerufen am 11.04.2023])

Bei dieser App muss vor Messbeginn eine neue Aufnahme erstellt und benannt werden. Im Anschluss kann über die Zahnräder oben rechts am Bildschirm die Genauigkeit eingestellt werden. Für die Messungen sollte die Genauigkeit auf „Höchste“ eingestellt sein. Trotz dieser Einstellung kann es vorkommen, dass nur alle zwei bis drei Sekunden ein neuer Messpunkt erstellt wird.

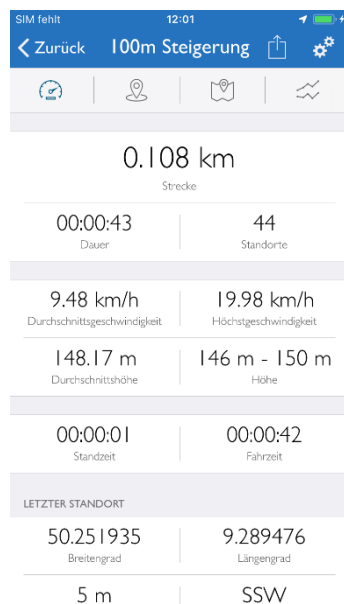


Abbildung 49 Messinformation innerhalb der Messung im GPS-Tracker

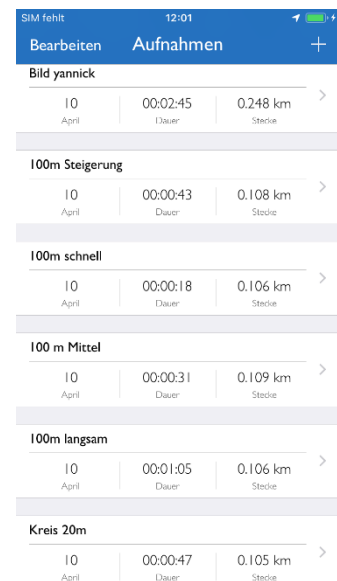


Abbildung 48 Übersicht der Aufnahmen im GPS-Tracker

Nach Beginn der Messung werden Informationen zur Genauigkeit, der Strecke sowie der Zeit angezeigt. Über die Felder am oberen Bildschirmrand kann auf eine Kartenansicht gewechselt werden.

Die Daten lassen sich über das Pfeilsymbol neben den Einstellungen in verschiedene Dateitypen exportieren und anschließend z.B. über E-Mail oder AirDrop versenden.

3.2.6. GPS-Tracks (IOS)

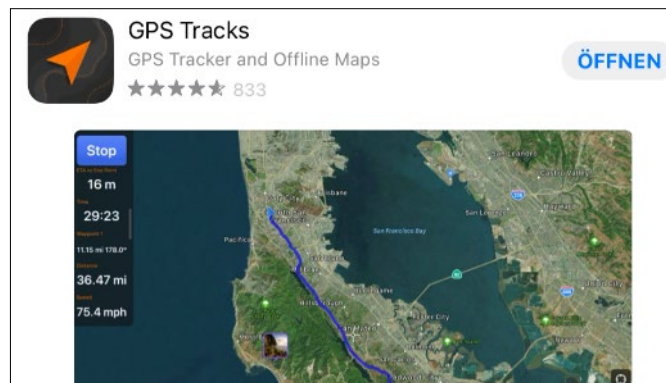


Abbildung 50 Screenshot von GPS-Tracks aus dem App Store (<https://apps.apple.com/de/app/gps-tracks/id425589565>) [abgerufen am 11.04.2023]

Um den vollen Umfang dieser App nutzen zu können, muss die Pro-Version gekauft werden. Die kostenlose Version bietet nur die Möglichkeit Daten aufzunehmen und die Strecke in der App anzuzeigen.

Ähnlich zum *GPX-Tracker* lässt sich die Genauigkeit nur nach Aktivitätstypen einstellen. Nach Beendigung der Aufnahme bildet die App ein Geschwindigkeitsdiagramm. In der kostenlosen Version ist es jedoch nicht möglich, die Einheiten umzustellen, weshalb manche Geschwindigkeiten in km/h andere in min/km angezeigt werden. Ebenso ist ein Export der Daten nur in der Pro-Version möglich.

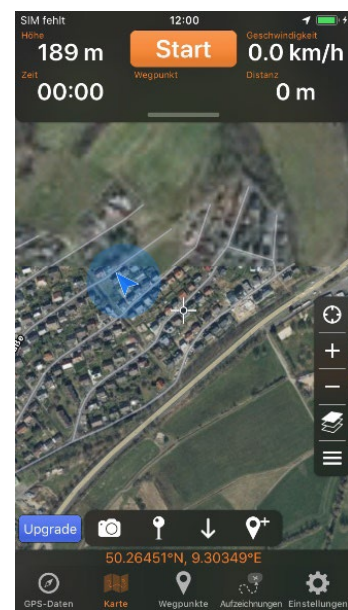


Abbildung 51 Übersicht in GPS-Tracks

3.3. Datenauswertung und Darstellung

Bei den heruntergeladenen Messdaten handelt es sich, außer bei *phyphox*, um .gpx-Dateien. Diese beinhalten die Positionen in Form der Längen- und Breitengrade (@lon, @lat), sowie die Höhe (@ele) der einzelnen Messpunkte. Für jede Messung ist außerdem die Zeit in Form der Uhrzeit angegeben. Für den weiteren Gebrauch müssen die gesammelten Daten aufbereitet werden.

3.3.1. Google Earth

Eine weitere Möglichkeit für die Darstellung von Alltagsbewegungen ermöglicht die kostenlose Software *Google Earth*. Dieses Programm kann Daten im .gpx-Format einlesen und in Luftbildkarten der Erdoberfläche darstellen.

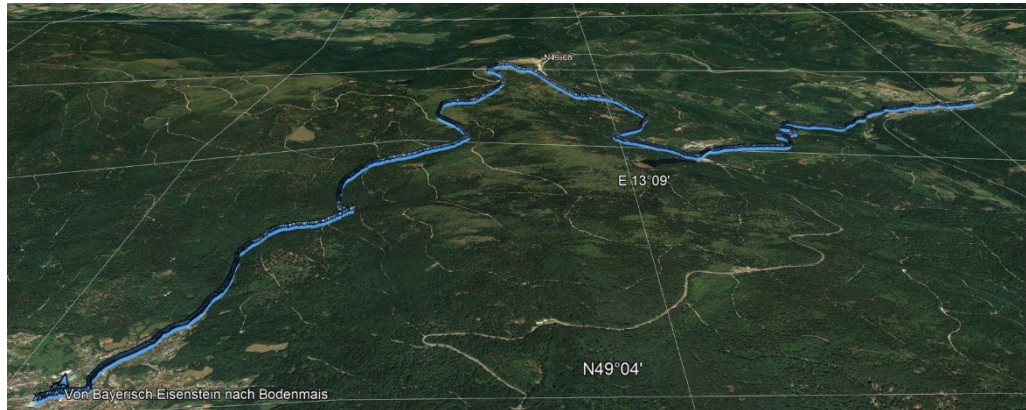


Abbildung 52 topographische Darstellung einer Wanderung in Google Earth (aufgenommen mit Komoot)

Die Daten können per Drag and Drop in das Programm importiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass im Pop-up Fenster die Haken bei allen Punkten gesetzt sind. Dadurch wird nicht nur die Strecke als Linie dargestellt, sondern auch die einzelnen Messpunkte als Pfeile, was bei der späteren Auswertung hilfreich sein kann.



Abbildung 53 Pop-Up Fenster beim Datenimport in Google Earth

Darüber hinaus bietet *Google Earth* die Möglichkeit ein Geschwindigkeits- bzw. Höhenprofil der Messung anzuzeigen. Dies kann durch Rechtsklick auf die Messung ausgewählt werden. Des Weiteren lässt sich im Höhenprofil die jeweilige Geschwindigkeit an verschiedenen Messpunkten ablesen. Gleichzeitig zeigt ein



Abbildung 54 Zugfahrt von Gelnhausen nach Offenbach mit Höhen bzw. Geschwindigkeitsprofil und markiertem Bereich (Ansicht in Google Earth, aufgenommen mit Geo-Tracker)

Pfeil auf der Karte die jeweilige Position auf der Ortskurve an. Durch Markieren eines Bereiches auf dem Höhenprofil kann dieser in der Karte hervorgehoben werden. *Google Earth* zeigt zusätzlich die minimale, maximale sowie die Durchschnittsgeschwindigkeit an. Dabei handelt es sich jeweils um den Betrag der Geschwindigkeit.

Im Vergleich zur dargestellten Messkurve in Excel handelt es sich bei *Google Earth* um geglättete Daten.

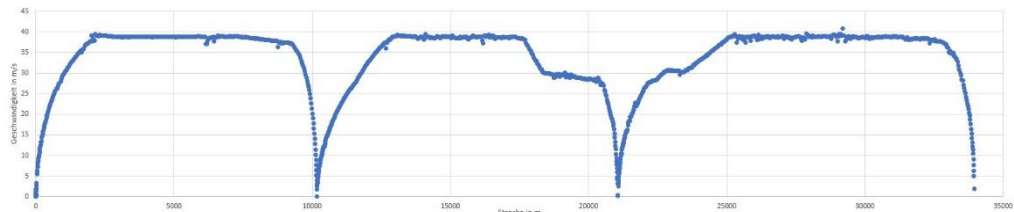


Abbildung 55 ungeglättete Darstellung der Zugfahrt in Excel in einem s-v-Diagramm

3.3.2. Web-Programm

Für die Anzeige von .gpx-Dateien ohne die Installation von spezifischen Programmen, gibt es spezielle Webseiten. Auf der Webseite von Jürgen Berkemeier (<https://www.j-berkemeier.de/ShowGPX.html#>), kann die .gpx-Datei per Drag and Drop hineingezogen werden.



Abbildung 56 Screenshot der Webseite (<https://www.j-berkemeier.de/ShowGPX.html#>) [abgerufen am 11.04.2023]

Neben einer Routendarstellung auf der Karte werden auf der rechten Seite ein Strecken-Höhen-Diagramm sowie ein s-v-Diagramm angezeigt.

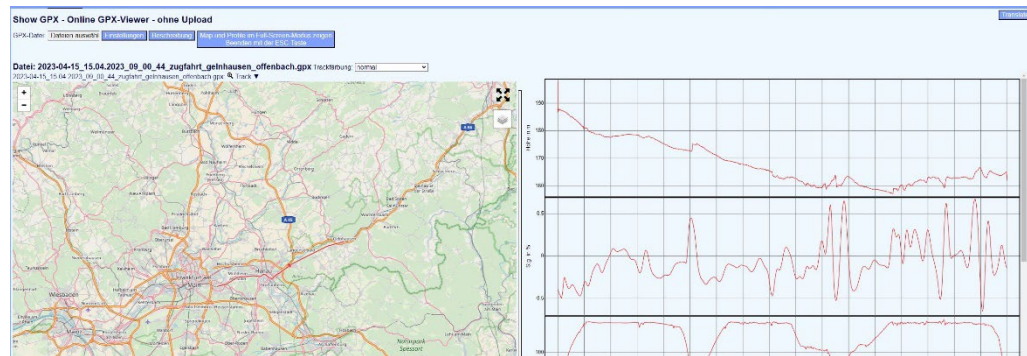


Abbildung 57 Zugfahrt von Gelnhausen nach Offenbach mit Höhen bzw. Geschwindigkeitsprofil und markiertem Bereich (Ansicht der Webseite, aufgenommen mit Geo-Tracker) (<https://www.j-berke-meier.de/ShowGPX.html#>) [abgerufen am 11.04.2023]

Unter Einstellung und Profil lässt sich das Zeitprofil aktivieren. Dabei wird neben der Geschwindigkeit auch die Höhe über die Zeit dargestellt. Durch Klicken auf die Diagramme können in der Kartenansicht zu einzelnen Wegpunkten weitere Daten wie Zeit, Höhe, Strecke und Geschwindigkeit auf der Karte angezeigt werden.

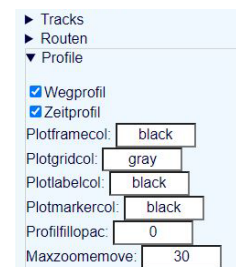


Abbildung 58 Ansicht der Einstellung zur Anzeige des Zeitprofils (<https://www.j-berke-meier.de/ShowGPX.html#>) [abgerufen am 11.04.2023]

Bei der Nutzung von Webseiten besteht jedoch das Problem, dass diese privat verwaltet werden. Deshalb kann es passieren, dass diese nach einiger Zeit abgeschaltet werden und somit Links nicht mehr funktionieren. Bei *Google Earth* ist eine Abschaltung aufgrund der Größe des Mutterkonzerns eher unwahrscheinlich.

3.3.3. Microsoft Excel

Die in den Kapiteln 3.3.1. sowie 3.3.2. gezeigten Möglichkeiten zur Datenauswertung können jeweils nur eine Datei darstellen. Ebenso bieten die Webseiten keine Möglichkeit, berechnete Wertetabellen mit z.B. den Geschwindigkeiten herunterzuladen, um diese für den Unterricht zu nutzen.

Für weitere Datenmanipulationen bzw. das gleichzeitige Anzeigen und Vergleichen von verschiedenen Messungen bietet *Microsoft Excel* zahlreiche

Möglichkeiten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Excelvorlage erstellt, die es ermöglichen soll, durchgeführte Bewegungsaufnahmen schnell und unkompliziert aufzubereiten. Diese Dateien befinden sich auf der CD, die zum Anhang gehört.

Die folgenden zwei Kapitel geben einen Überblick über die erstellten Dateien sowie wichtige Befehle für einen sicheren Umgang. Ebenso werden verwendete Formeln für die Bestimmung der Strecke oder zur Bildung der Mittelwerte genannt und erklärt.

3.3.3.1. Anleitung und Aufbau der Exceldatei

Auf der beiliegenden CD befinden sich im Ordner „Vorlagen für Auswertung“ drei verschiedene *Excel*dateien. Nach einer der durchgeführten Messung lässt sich die .gpx-Datei in *Excel* öffnen. Hierfür muss die eventuell angezeigte Fehlermeldung bestätigt und im Anschluss auf „XML als eine schreibgeschützte Arbeitsmappe öffnen“ geklickt werden.

In der nun angezeigten Datei befinden sich in der Tabelle rechts verschiedene Spalten mit den aufgezeichneten Messpunkten. Für die Auswertung müssen die Spalten „@lat“ (Breitengrad), „@lon“ (Längengrad), „@ele (Höhenangabe)“ sowie „time“ (Zeitangabe der Messpunkte) kopiert und in die markierten Spalten der Auswertungsdatei eingefügt werden.

Excel berechnet nun automatisch für jeden Punkt die Streckendifferenz sowie jeweils das Tempo und den Beschleunigungsbetrag. In den Blättern am linken unteren Bildschirmrand können sowohl mehrere Messungen hinzugefügt als auch verschiedene Diagramme angezeigt werden. Hier müssen bei Bedarf die Tabellen durch Klicken und ziehen des Viereckes unten rechts auf die Anzahl der Messwerte angepasst werden. Falls sich der Datenbereich des Diagramms nicht automatisch anpasst, muss dieser ebenfalls über die ausgewählten Daten gezogen werden.

Für die individuelle Nutzung wurden des Weiteren Blankotabellen für verschiedene Diagramme vorbereitet.

Datenbereich 1	Datenbereich 2
\$B\$9:\$B\$10	\$C\$9:\$C\$10

Abbildung 59 Datenbereiche Mittelwertberechnung (Screenshot Excel)

```
=MITTELWERT(BEREICH.VERSCHIEBEN($B$9:$B$10;ZEILE()*$C$7-9*$C$7;))
```

Abbildung 60 Formel zur Mittelwertberechnung (Screenshot Excel)

Auf dem Blatt „Berechnung von Mittelwerten“ können bei Bedarf ausgewählte und zusammenhängende Werte eingefügt werden. Beim Einfügen muss darauf geachtet werden, die Einfügeoption „Nur Werte einfügen“ zu verwenden. Alternativ kann dies durch die Tastenkombinationen STRG+C (kopieren), STRG+V (einfügen) und, während die eingeführten Werte noch markiert sind, STRG<W (STRG drücken, loslassen und anschließend W drücken) erreicht werden. Für die Berechnung der Mittelwerte kann der Bereich über der Tabelle eingestellt werden. In der Tabelle daneben müssen nun die jeweiligen Formeln angepasst werden (siehe Hinweise über der Tabelle sowie Datenbereich 1 und 2).

Die berechneten Mittelwerte können wie beschrieben in die Blankovorlagen übertragen werden.

Die Datenauswertung von *Phyphox* in der entsprechenden *Excel*datei erfolgt nach dem gleichen Prinzip. Hier müssen die Werte „Time“, „Latitude“, „Longitude“ und „Altitude“ kopiert und in die entsprechenden Spalten eingefügt werden.

Eine Besonderheit besitzt die *Excel*datei „Auswertung Kreis Bewegung“. Hier werden neben dem Tempo und dem Betrag der Beschleunigung auch die Ortsänderung sowohl auf der x- als auch auf der y-Achse berechnet. Im Feld „Mittelwerte“ wird anschließend daraus der Mittelwert über eine belie wählbare Anzahl gebildet sowie jeweils die Geschwindigkeits- und

Beschleunigungsvektoren berechnet. In der Tabelle wird die jeweilige Ortsänderung dargestellt. Die Werteauswahl kann dabei wie beschrieben angepasst werden.

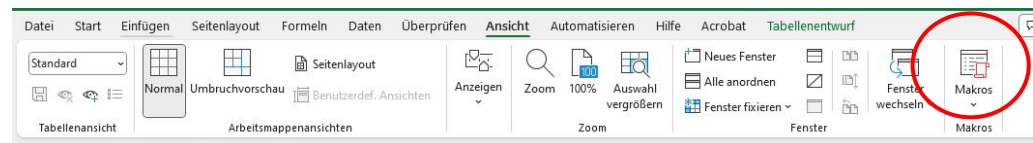


Abbildung 61 Ort für Makros (Screenshot Excel)

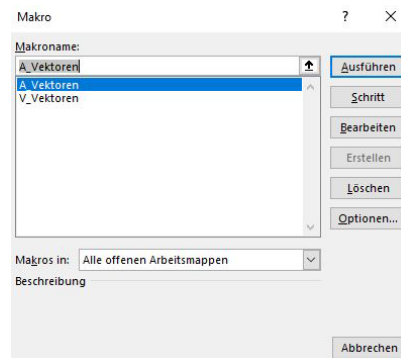


Abbildung 62 Auswahl, Ausführung und Bearbeitung von Makros (Screenshot Excel)

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Makro (Anhang III) ermöglicht es, durch „Makros“ und „Makros anzeigen“ im Register „Ansicht“, automatisch die jeweiligen Vektoren in das Diagramm einzufügen. Anschließend können überflüssige Vektoren durch Anklicken und ENTF gelöscht werden. Die Werte für die Darstellung stammen jeweils aus den Blättern „vVektor“ und „aVektor“. Diese Tabellen können ebenfalls bei Bedarf individuell erweitert werden. In den beiden *Excel*-vorlagen zur Kreisbewegung werden die Vektoren jeweils unterschiedlich berechnet (Formeln hierfür siehe Kapitel 3.4.4.2.).

3.3.3.2. Erklärung der verwendeten Befehle

Die Entfernung zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche kann für ein kleines Gebiet durch den Satz des Pythagoras und die jeweiligen Konstanten der durchschnittlichen Abstände zwischen zwei Längen- und zwei Breitengraden in Mitteleuropa bestimmt werden. Deshalb wurde diese Formel für die Berechnung der einzelnen Ortsänderungen bei der Kreisbewegung aufgrund des kleinen Kreisgebiets verwendet.

$$s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (21)$$

$$\Delta x = 71,5 \cdot (lon1 - lon2)$$

$$\Delta y = 111,3 \cdot (lat1 - lat2)$$

Mit

s: Entfernung in km

lat: Breitengrad in Grad

lon: Längengrad in Grad

71,5 Mittlerer Abstand zwischen zwei Längengraden

111,3 Mittlerer Abstand zwischen zwei Breitengraden

Aufgrund der Annahme, dass mit Smartphones auch größere Entfernungen gemessen werden können, wird die Berechnung der Entfernung in *Excel* durch die Haversine Formel, welche die Entfernung auf einer Kugeloberfläche berechnet, durchgeführt.

$$s = r \cdot \cos^{-1}(\sin(lat1) \cdot \sin(lat2) + \cos(lat1) \cdot \cos(lat2) \cdot \cos(lon2 - lon1)) \quad (22)$$

Mit

s: Entfernung in km

lat: Breitengrad in Grad

lon: Längengrad in Grad

r: Radius der Erde mit $r = 6371 \text{ km}$

Die in Kilometer angegebene Strecke muss nun in Meter umgerechnet werden und kann mit

$$= \text{Runden}(\text{Ausgewählte Zelle}; \text{Anzahl der Stellen hinter Komma}) \quad (23)$$

automatisch auf zwei Nachkommastellen (maximale Genauigkeit der Position) gerundet werden.

Die Zeit wird durch die folgenden Funktionen in Stunden, Minuten und Sekunden getrennt und anschließend in Sekunden umgerechnet.

$$= \text{Stunden}(\text{ausgewählte Zelle}) \quad (24)$$

$$= \text{Minute}(\text{ausgewählte Zelle}) \quad (25)$$

$$= \text{Sekunden}(\text{ausgewählte Zelle}) \quad (26)$$

Die Berechnung der Mittelwerte erfolgt mithilfe der Funktionen MITTELWERT sowie BEREICH.VERSCHIEBEN. Der jeweilige Bereich in der Formel muss je nach Größe, über die der Mittelwert bestimmt wird, angepasst werden. Die einzutragenden Werte befinden sich über der Formel und ersetzen den markierten Bereich.

$$= \text{Mittelwert}(\text{Bereich. Verschieben}(\text{Ausgewählter Bereich}; \quad (27)$$

$$\text{Anzahl der zu verschiebenden Zeilen})$$

Die Anzahl der zu verschiebenden Zeilen wird durch eine weitere Funktion erhalten. Diese fragt zunächst die aktuelle Zeile mit „ZEILE()“ ab und multipliziert die Anzahl der Werte, über die der Mittelwert gebildet wird (z.B. 3). Von diesem Wert wird nun das Produkt aus dem Wert der festeingetragenen Nummer der ersten Tabellenzeile (9) und der Anzahl der Werte, über die der Mittelwert gebildet wird (z.B. 3), subtrahiert.

$$\text{erster Wert: } 9 \cdot 3 - 9 \cdot 3 = 0 \text{ (keine Verschiebung)}$$

$$\text{zweiter Wert: } 10 \cdot 3 - 9 \cdot 3 = 3 \text{ (Verschiebung um 3}$$

im Vergleich zur ersten Berechnung)

Dabei ist darauf zu achten, dass sämtliche Werte als absolute Werte (\$ vor der Zeile und der Spalte) eingegeben werden. Im Unterschied zu relativen Werten werden absolute Werte bei einem Verschieben der Formel nicht automatisch angepasst. Beispielsweise wird eine Formel in C1 mit (=A1+B1) verschoben bzw. erweitert auf D1. Die automatisch angepassten Bezüge in der Formel werden ebenfalls jeweils um eine Spalte verschoben (=B1+C1). Mit einer absoluten Angabe (=\$A\$1+\$B\$1) bleiben die Bezüge unverändert. In Excel kann nach der Auswahl der Zellen mit F4 zwischen den verschiedenen absoluten Optionen durchgeschaltet werden.

3.4. Mögliche Experimente

Die im Folgenden vorgestellten Experimente beschränken sich auf Versuche der Kinematik im Inhaltsfeld „Fortbewegung und Mobilität“ (Hessisches Kultusministerium, 2023a). Dabei werden relevante Formeln benannt, die Experimente

im Detail beschrieben und Hinweise zur Durchführung gegeben. Im Anschluss werden die Experimente im Kerncurriculum für Physik an Gymnasien eingeordnet.

3.4.1. Zeichnen von GPS-Bildern

Der Versuch soll den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit geben, erste eigene Erfahrungen mit der Aufnahme von Strecken und Bewegungen zu machen. Das Ziel ist, mit Apps die Wegpunkte im Gelände abzulaufen und diese direkt auf dem Bildschirm anzuzeigen und nachzuzeichnen.

3.4.1.1. Grundlagen

Die Funktionsweise der satellitengestützten Ortung muss für die Schulnutzung didaktisch reduziert werden. Für ein grundlegendes Verständnis für Schülerinnen und Schüler genügt es, dass Satelliten im Erdorbit Signale aussenden, welche von den jeweiligen Empfangsgeräten ausgewertet werden und die Entfernung bestimmen.

Im Unterricht kann dies durch ein praktisches Beispiel mithilfe von Seilen verdeutlicht werden. Im Prinzip gleicht der Aufbau dem der Abbildungen 12-14. Die Schülerinnen und Schüler halten das Seil gespannt und sollten nun herausfinden wie viele Seile sie mindestens benötigen, bis die Person in der Mitte sich nicht mehr frei bewegen kann. In diesem Zusammenhang sollte die Funktion des vierten Satelliten mit der didaktischen Reduktion erklärt werden, dass er lediglich die anderen Satelliten überprüft.

Aus dem Mathematikunterricht kennen die Schülerinnen und Schüler bereits Koordinatensysteme. An diese Vorerfahrungen kann bei der Verdeutlichung der geographischen Koordinaten angeknüpft werden. Hierfür bietet sich die Nutzung von *Google Earth* an.

Alternativ kann im Unterricht zur Veranschaulichung der Funktionsweise eines Navigationssystems ein Video des WDR aus der Reihe der Sachgeschichten der „Sendung mit der Maus“ gezeigt werden. Im Video (<https://www.wdrmaus.de/filme/sachgeschichten/navigationssystem.php5>)

werden sowohl die Funktionsweise der Satellitenortung (3:05 min-6:20 min) als auch die geografischen Koordinaten erklärt (6:20 min-8:05 min).

3.4.1.2. Beschreibung der Experimente

Vor dem Versuchsbeginn sollten sich die Schülerinnen und Schüler entweder in Gruppen oder allein ein Motiv überlegen, welches sich möglichst in einem Zug auf einer Fläche zeichnen lässt. Dieses Motiv laufen die Schülerinnen im Anschluss auf einer großen Fläche ab. Um einem zwischenzeitlich schlechteren GPS-Empfang vorzubeugen, eignet sich für die Aufnahme der Schulhof oder der Sportplatz.

Vor Aufzeichnungsbeginn sollten alle Schülerinnen und Schüler die Genauigkeitseinstellungen der Geräte überprüfen, da dies sonst zu unsauberen Sprüngen in der Aufnahme führt.

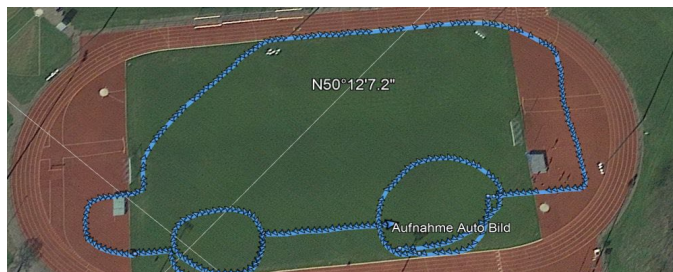


Abbildung 63 Bild „Auto“ (dargestellt in Google Earth, aufgenommen mit Geo-Tracker)

Nach einigen erfolgreichen Versuchen kann mit einer zwischenzeitlichen Pausierung der Aufnahme experimentiert werden, um somit komplexere Bilder zu zeichnen (Abbildung 65).

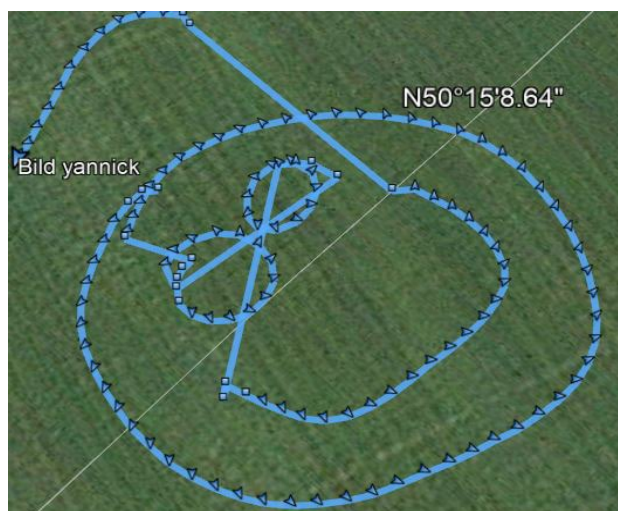


Abbildung 64 Bild „Gesicht“ (dargestellt in Google Earth, aufgenommen mit GPS-Tracker)

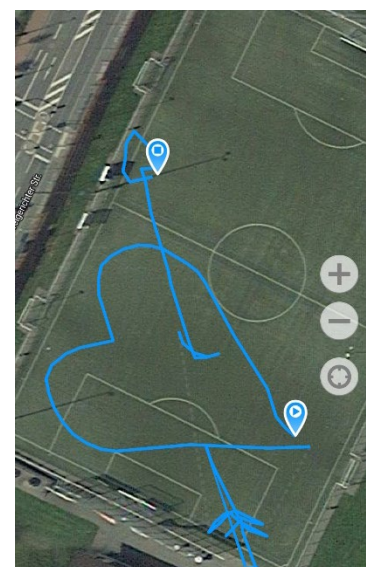


Abbildung 65 Bild „Herz“ (Screenshot aus der App, aufgenommen mit Geo-Tracker)

3.4.1.3. Einordnung in den Physikunterricht

Durch Zeichnen von GPS-Bildern sammeln die Schülerinnen und Schüler erste Erfahrungen mit Bewegungsaufnahmen mithilfe des Smartphones. Ebenso erlangen sie wichtige Erkenntnisse über die Funktionsweise der Satellitenortung. Die Schülerinnen und Schüler können weitere, gegebenenfalls komplexere Bilder, als Hausaufgabe zeichnen, jedoch ist dann darauf zu achten, dass jedes Kind ein Smartphone mit der App und den korrekten Einstellungen besitzt.

3.4.2. Gleichförmige Bewegungen

Die Experimente zur gleichförmigen Bewegung sollen die Begriffe Tempo und Geschwindigkeit einführen und veranschaulichen. Ebenso können die verschiedenen Tempos und die damit zusammenhängenden Graphen verglichen werden.

3.4.2.1. Grundlagen

Die Geschwindigkeit ist eine vektorielle Größe mit einem Betrag und einer Richtung. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der Änderungsrate des Ortes und der dafür benötigten Zeit. Für die folgenden Experimente wird die Richtung der Geschwindigkeit nicht benötigt. Aus diesem Grund werden nur die Geschwindigkeitsbeträge, also das Tempo, betrachtet.

Das mittlere Tempo \bar{v} lässt sich durch

$$\bar{v} = |\vec{v}| = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\text{zurückgelegte Strecke}}{\text{dafür benötigte Zeit}} \quad (28)$$

bestimmen. Für die Momentangeschwindigkeit gilt:

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (29)$$

Im Idealfall stimmen bei einer gleichförmigen Bewegung das durchschnittliche Tempo mit dem momentanen Tempo überein.

3.4.2.2. Beschreibung der Experimente

Das erste Experiment beschäftigt sich qualitativ mit dem Tempobegriff. Hierfür werden verschiedene 100 m Läufe mit jeweils einem konstanten Tempo durchgeführt. Die Messabstände werden dafür im Geo-Tracker auf 1 s eingestellt. Die Messungen sind in *Google Earth* dargestellt.

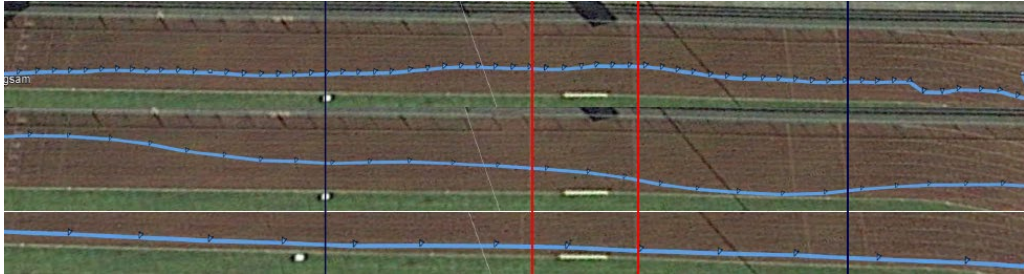


Abbildung 66 Darstellung der 100 m Läufe mit verschiedenen Tempos (dargestellt in Google Earth, aufgenommen mit Geo-Tracker)

Anhand der Darstellung lässt sich die Definition des Tempos anschaulich beschreiben. Je nachdem wie schnell die Person läuft, erscheinen mehr (geringes Tempo) oder weniger (hohes Tempo) Messpunkte innerhalb des markierten Streckenabschnitts (Abbildung 66).

Anhand der gleichbleibenden Abstände innerhalb einer Messreihe lässt sich weiterhin erkennen, dass jeweils innerhalb einer Sekunde die gleiche Strecke zurückgelegt wird, also das Tempo konstant bleibt.

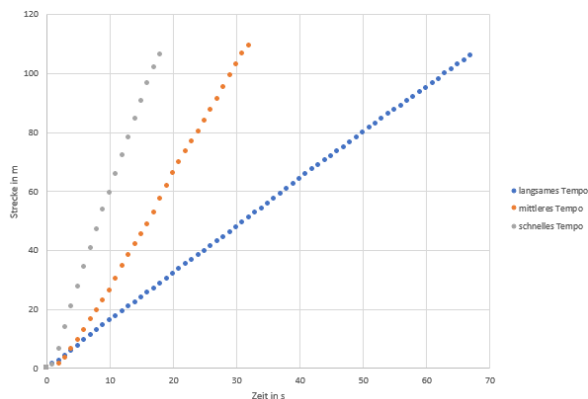


Abbildung 67 t-s-Diagramm: 100 m schnelles Tempo (Sprint), mittleres Tempo (Joggen), langsames Tempo (Gehen) (dargestellt in Excel)

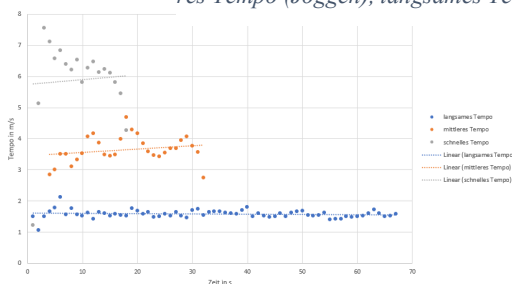


Abbildung 68 t-v-Diagramm: 100 m schnelles Tempo (Sprint), mittleres Tempo (Joggen), langsames Tempo (Gehen) (dargestellt in Excel)

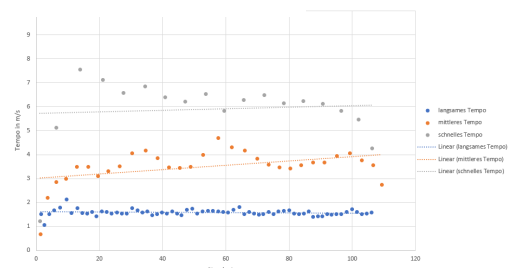


Abbildung 69 s-v-Diagramm: 100 m schnelles Tempo (Sprint), mittleres Tempo (Joggen), langsames Tempo (Gehen) (dargestellt in Excel)

Die mit *Excel* dargestellten Bewegungsdiagramme ermöglichen ebenfalls eine Interpretation der Werte. Das Abfallen des Tempos gegen Ende der grauen und orangefarbenen Messung lässt sich darauf zurückführen, dass die sprintende Person gegen Ende der Strecke ermüdet.

Über die Steigung kann nun das Tempo berechnet werden. Ebenfalls lässt sich der Unterschied zwischen dem durchschnittlichen und dem momentanen Tempo verdeutlichen. Während im mittleren Lauf das durchschnittliche Tempo $\bar{v} = 3,51 \frac{m}{s}$ beträgt, schwankt das momentane Tempo je nach Messpunkt zwischen $v = 2,21 \frac{m}{s}$ und $v = 4,69 \frac{m}{s}$.

Trotz kleiner Ungenauigkeiten in den Messungen ist der Zusammenhang zwischen Weg, Zeit und Tempo gut zu erkennen.

Eine weitere Messung wird mit dem Fahrrad auf dem Sportplatz über 400 m durchgeführt.

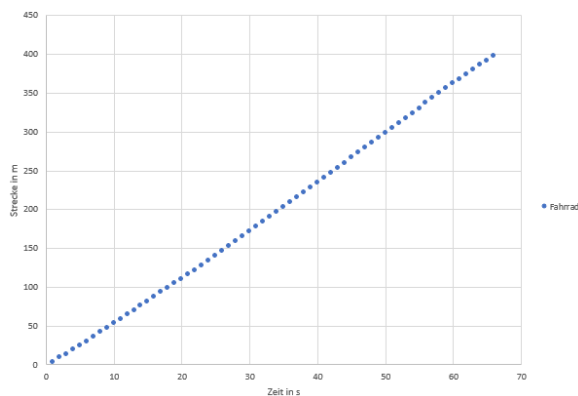


Abbildung 70 t-s-Diagramm: 400 m Fahrradfahren (dargestellt in Excel)

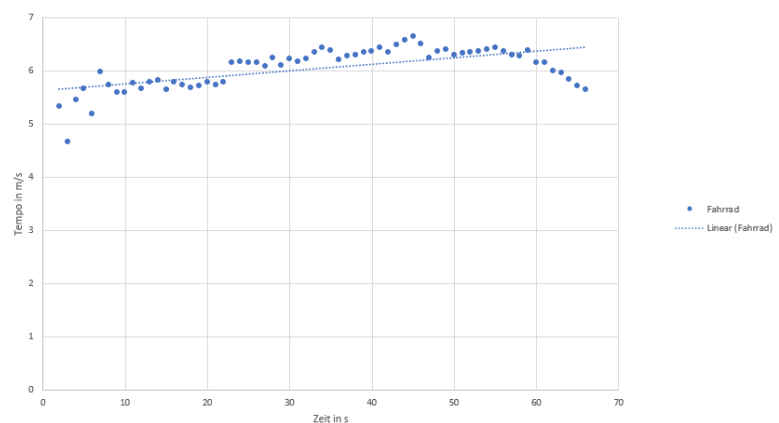


Abbildung 71 t-v-Diagramm: 400 m Fahrradfahren (dargestellt in Excel)

3.4.2.3. Einordnung in den Physikunterricht

Die in diesen Experimenten genutzten Grundbegriffe für die Beschreibung von gleichförmigen Bewegungen finden sich im Kerncurriculum der Sekundarstufe I an Gymnasien im Themengebiet „Fortbewegung und Mobilität“.

Die Schülerinnen und Schüler sollen im Kompetenzbereich „Erkenntnisgewinnung“ verschiedene qualitative und quantitative Experimente für die Bestimmung der Geschwindigkeiten durchführen. Im Bereich „Kommunikation“ sollen die Schülerinnen und Schüler die korrekten Fachbegriffe nutzen, die Ergebnisse vorstellen und Zusammenhänge von Weg, Zeit und Tempo darstellen.

Die Messungen können mit verschiedenen Fortbewegungsmitteln, wie z.B. Inliner oder Skateboard, durchgeführt werden. Dies gibt den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit, persönliche Hobbys in den Physikunterricht zu integrieren, indem sie Aufzeichnungen beispielsweise vom Reiten, Schwimmen (mit wasserdichtem Smartphone) oder Radfahren vornehmen und die eigenen Daten im Anschluss auswerten, darstellen und gegebenenfalls präsentieren.

Aufgrund schwankender Messwerte bietet es sich an, die Idealisierung von Messdaten und die Funktion von Trendlinien zu besprechen. Die Schülerinnen und Schüler lernen, dass eine konstante Geschwindigkeit eher eine Idealvorstellung ist.

Im Rahmen der Ergebnisbesprechung im Unterricht ist darauf zu achten, dass die Schülerinnen und Schüler die Fachbegriffe korrekt anwenden. Mit dem Alltagsgebrauch des Begriffs „Geschwindigkeit“ verstehen die Schülerinnen und Schüler nur, wie schnell oder langsam sich ein Körper bewegt (Schecker et al., 2018). Aus diesem Grund ist es wichtig, dass der Richtungsaspekt des Vektors der Geschwindigkeit thematisiert wird. Hierfür eignet sich das beschriebene Experiment „Kreisbewegung“ (siehe Kapitel 3.4.4.). Für den Betrag der Geschwindigkeit sollten die Begriffe Tempo oder Schnelligkeit genutzt werden.

Ebenfalls sollten Formulierungen wie „ v ist gleich s durch t “ vermieden werden, da diese die Fehlvorstellung vermitteln, dass die Geschwindigkeit durch Momentangrößen bestimmt werden könnte (Schecker et al., 2018). In Bezug auf die Diagramme (Abbildung 67) können Schülerinnen und Schüler für die Beschreibung des Tempos Formulierungen verwenden, wie z.B. „Der graue Pfad

beschreibt ein höheres Tempo als der blaue Pfad, da in der gleichen Zeitspanne eine größere Strecke zurückgelegt wird.“

3.4.3. Beschleunigte Bewegungen

Neben der Einführung des Beschleunigungsbegriffs sollen in den vorgestellten Experimenten verschiedene Bewegungsdiagramme erstellt und analysiert werden. Dafür werden Bewegungen mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln über verschiedene Zeiten aufgenommen.

3.4.3.1. Grundlagen

Die Experimente zur gleichförmigen Bewegung zeigen, dass es sich im Alltag immer um beschleunigte Bewegungen handelt. Der Beschleunigungsvektor beschreibt eine Änderung der Geschwindigkeit über die Zeit. Die allgemeine Gleichung lautet

$$\vec{a}(t) = \dot{\vec{v}}(t) = \ddot{\vec{s}}(t). \quad (30)$$

Da in den folgenden Experimenten nur die Tempoänderung eine Rolle spielt, wird der Betrag der Beschleunigung gebildet. Die Größe der mittleren Beschleunigung lässt sich dabei durch

$$\bar{a} = |\bar{a}| = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\text{Geschwindigkeitsdifferenz}}{\text{Zeitdifferenz}} \quad (31)$$

berechnen. Ebenfalls gilt

$$a(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}. \quad (32)$$

3.4.3.2. Beschreibung der Experimente

Die erste Aufnahme zeigt das Losrollen mit einem Fahrrad an einem Hang mit einem gleichmäßigen Gefälle.



Abbildung 72 bergab rollen mit dem Fahrrad (dargestellt in Google Earth, aufgenommen mit Geo-Tracker)

Die in *Google Earth* angezeigte Messung verdeutlicht eine Vergrößerung der Abstände zwischen den Messpunkten. Je schneller der Körper wird, desto größer sind die Abstände der Messpunkte bei gleichen Zeitintervallen.

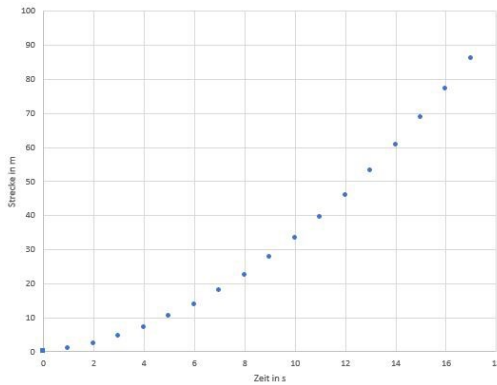


Abbildung 73 t-s-Diagramm: bergab rollen (dargestellt in Excel)

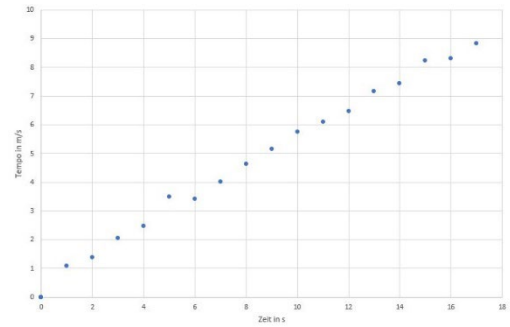


Abbildung 74 t-v-Diagramm: bergab rollen (dargestellt in Excel)

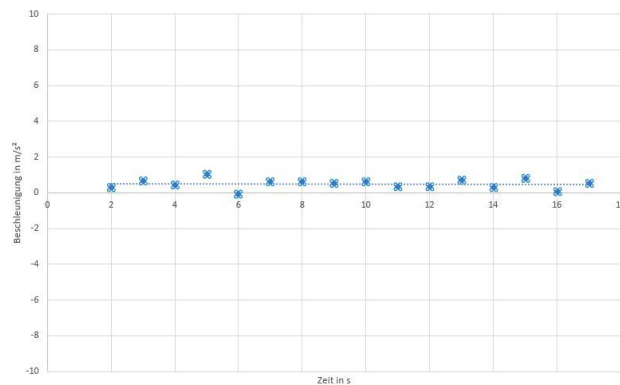


Abbildung 75 t-a-Diagramm: bergab rollen (dargestellt in Excel)

Die Auswertung in *Excel* zeigt ebenfalls deutlich die Temposteigerung und die damit verbundene Beschleunigung.

Neben der Darstellung von Tempo und Beschleunigung bei einer weiteren Messung in einem Zug kann in diesem Zusammenhang das Anfahren und Abbremsen des Zuges in einem zusätzlichen Diagramm dargestellt werden.

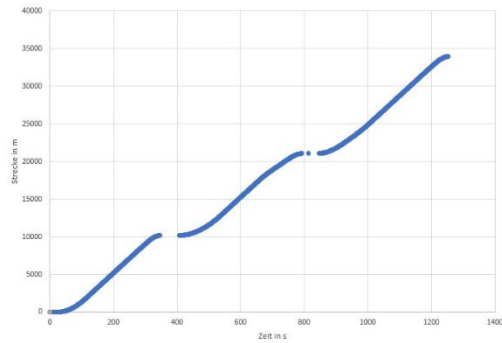


Abbildung 76 t-s-Diagramm: Zugfahrt (dargestellt in Excel)

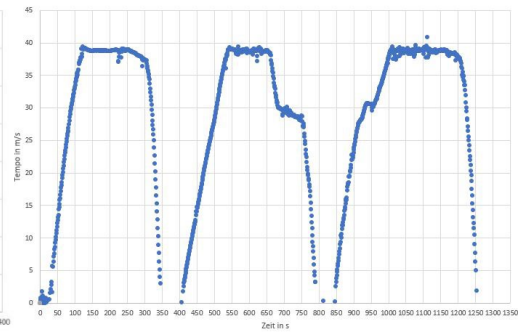


Abbildung 77 t-v-Diagramm: Zugfahrt (dargestellt in Excel)

Auch hier ist eine deutliche positive bzw. negative Beschleunigung zu erkennen. Die größere negative Beschleunigung beim Bremsvorgang sorgt für ein stärkeres Abfallen des Tempos als die geringe Beschleunigung bei der Anfahrt des Zugs.

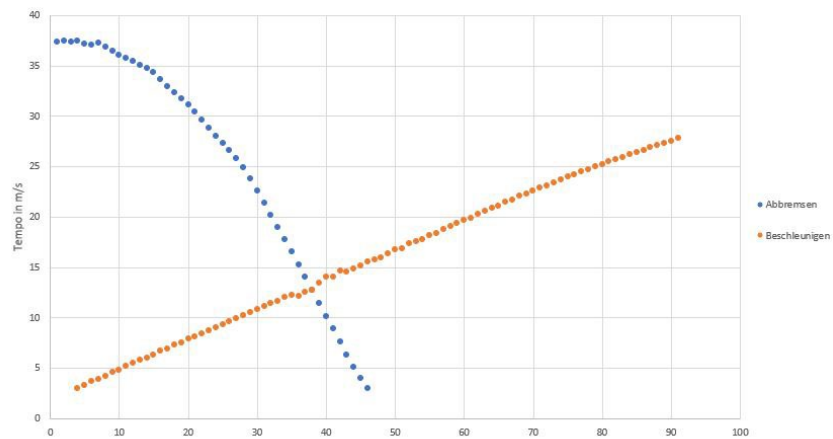


Abbildung 78 t-v-Diagramm: Beschleunigungs- und Bremsvorgang Zug (dargestellt in Excel)

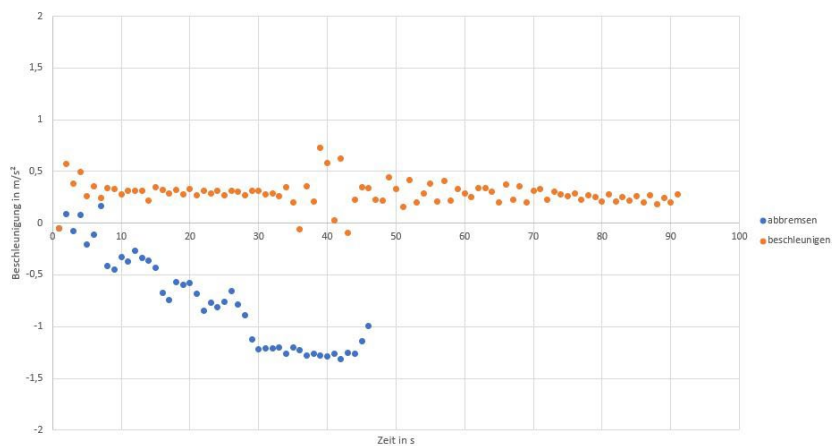


Abbildung 79 t-a-Diagramm: Beschleunigungs- und Bremsvorgang Zug (dargestellt in Excel)

Die letzte Messung während einer Autofahrt zeigt in *Google Earth* die verschiedenen Tempos auf den unterschiedlichen Streckenabschnitten.



Abbildung 80 Ausschnitt Autofahrt: Abstände der Messpunkte werden nach Verlassen der Ortschaft größer, demnach steigt das Tempo. (dargestellt in *Google Earth*, aufgenommen mit *Geo-Tracker*)

3.4.3.3. Einordnung in den Physikunterricht

Die durchgeführten Messungen verdeutlichen die Zusammenhänge zwischen Zeit, Weg, Tempo und Beschleunigung. Darüber hinaus kann dies auch mathematisch durch Ableitung der Regressionsgeraden belegt werden. Des Weiteren können Zusammenhänge zwischen Durchschnitts- und Momentantempo gezeigt werden.

Beim Zeichnen und Analysieren der Diagramme sollen die Fachbegriffe korrekt angewendet werden. Die t-s-Diagramme bieten Interpretationsmöglichkeiten, um welches Fortbewegungsmittel es sich handelt. Die Schülerinnen und Schüler suchen nach Erklärungen für die Lücken in den Diagrammen.

Die vektorielle Betrachtung kann darüber hinaus über die Kreisbewegung (siehe Kapitel 3.4.4.) durchgeführt werden.

Ebenso sollte wie bereits bei der gleichförmigen Bewegung auf eventuelle Fehlvorstellungen der Schülerinnen und Schüler eingegangen werden. Es sollten Begriffe wie z.B. „negative Beschleunigung“ mithilfe der Bewegungsdiagramme verdeutlicht werden. Ferner sollte gezeigt werden, dass eine große Beschleunigung nicht automatisch mit einem hohen Tempo gleichgesetzt werden kann (Schecker et al., 2018). In den beschriebenen Beispielen der Beschleunigung eines Zugs im Vergleich zu der eigenen bei einem Sprint offenbart sich, dass die

Beschleunigung des Zuges im Mittel $a = 0,28 \frac{m}{s^2}$ beträgt, während die Beschleunigung des Läufers zu Beginn des Sprints bei ca. $a = 3,16 \frac{m}{s^2}$ liegt (siehe Messreihe zur gleichförmigen Bewegung in Kapitel 3.4.2.). Dabei ist klar, dass der Läufer nicht mit dem maximalen Tempo eines Zuges mithalten kann.

3.4.4. Kreisbewegung

In dem folgenden Experiment wird eine besondere Bewegung, die Kreisbewegung, thematisiert. Dabei sollte auf die Fehlvorstellung der Schülerinnen und Schüler zur Beschleunigung eingegangen werden (Schecker et al., 2018).

3.4.4.1. Grundlagen

Die Geschwindigkeit in einer Kreisbewegung wird durch die Winkelgeschwindigkeit ω oder die Bahngeschwindigkeit v beschrieben.

Die Bahngeschwindigkeit (Betrag der Geschwindigkeit) ist der Quotient der zurückgelegten Strecke auf der Kreisbahn und der dafür benötigten Zeit. Sie kann durch Formel 28 bzw. angepasst auf die Geometrie des Kreises mit der Umlaufdauer T

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (33)$$

bestimmt werden.

Die einzelnen Komponenten der Geschwindigkeit \vec{v} lassen sich durch

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta s_x}{\Delta t} \\ \frac{\Delta s_y}{\Delta t} \end{pmatrix} \quad (34)$$

berechnen und die jeweilige Beschleunigung \vec{a} durch:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \\ \frac{\Delta v_y}{\Delta t} \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Die Winkelgeschwindigkeit (Betrag der Geschwindigkeit) lässt sich aus der Größe des überstrichenen Winkels φ und der dafür benötigten Zeit durch

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \text{ bzw. } \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (36)$$

beschreiben. Durch Multiplikation von Winkelgeschwindigkeit ω und Radius r wird die jeweilige Bahngeschwindigkeit v berechnet.

3.4.4.2. Beschreibung des Experiments

Eine Person steht in der Mitte des Kreises und hält das Ende eines Maßbands fest. Eine zweite Person hält in der einen Hand das Maßband und in der anderen Hand das Smartphone. Alternativ können Kreise auch vorher mit Kreide auf den Boden gezeichnet werden. Die Größe der Radien sollte je nach Genauigkeit nicht zu gering gewählt werden. Beim Ablaufen des Kreises ist auf ein möglichst konstantes Tempo zu achten. Die folgenden Aufnahmen wurden mit dem *Geo-Tracker* und einem Radius von 15 m erstellt.

Nach dem Datenimport in *Excel* in die dafür vorbereitete Tabelle wird eine Bahnkurve ausgegeben. Zudem können die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren durch das programmierte Makro automatisch eingefügt werden. Die Werte der Bahnkurve auf der x- bzw. y-Achse spiegeln dabei nicht die tatsächliche Größe der Kurve wider, da die Anfangswerte für eine bessere Darstellung entfernt wurden.

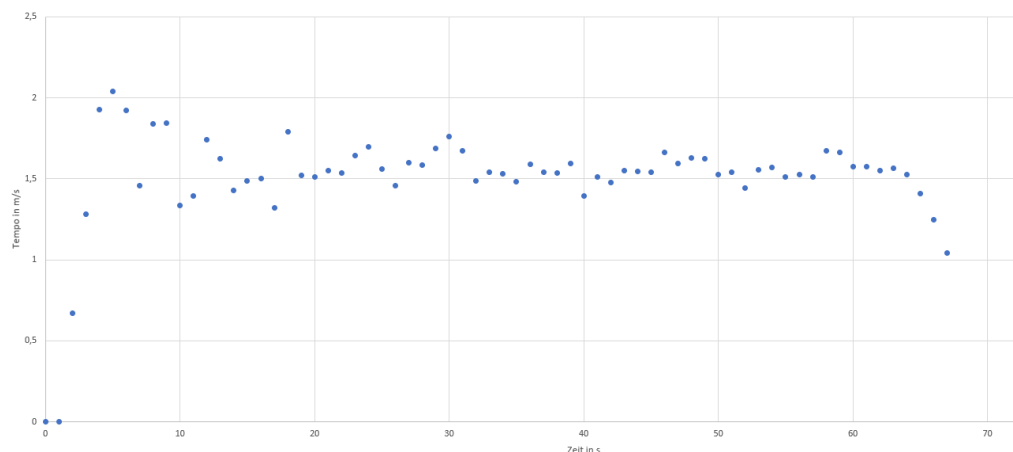


Abbildung 81 t-v Diagramm: konstantes Tempo bei Kreisbewegung (dargestellt in Excel)

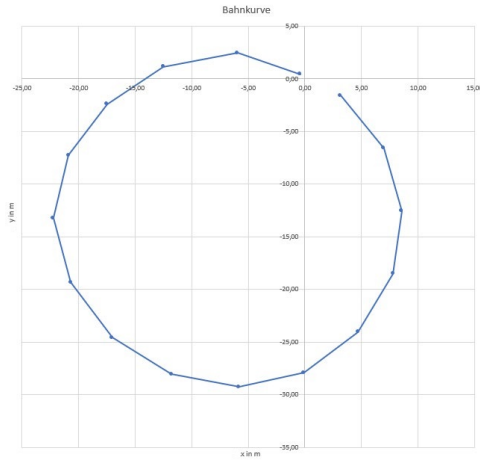


Abbildung 82 Bahnkurve der Kreisbewegung (dargestellt in Excel)

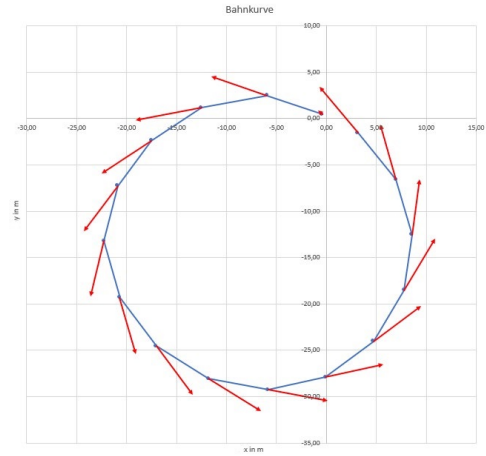


Abbildung 83 Bahnkurve und Geschwindigkeitsvektoren der Kreisbewegung (dargestellt in Excel)

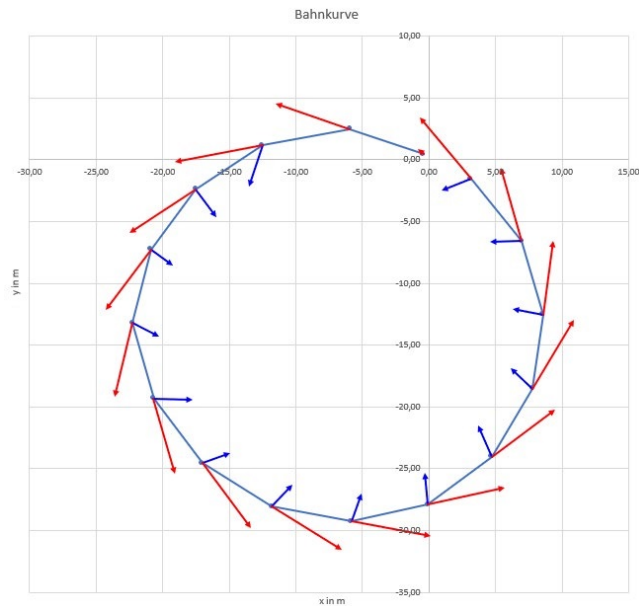


Abbildung 84 Bahnkurve mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren, berechnet jeweils aus dem vorherigen Abschnitt (dargestellt in Excel)

Die Berechnung der in Abbildung 82-84 dargestellten Vektoren erfolgt durch

$$\vec{v}(t_i) = \frac{\vec{s}(t_i) - \vec{s}(t_{i-1})}{\Delta t} \quad (37)$$

$$\vec{a}(t_i) = \frac{\vec{v}(t_i) - \vec{v}(t_{i-1})}{\Delta t} \quad (38)$$

Ebenfalls werden die Vektoren jeweils aus dem vorherigen und nächstkommen- den Wert berechnet (Abbildung 85).

$$\vec{v}(t_i) = \frac{\vec{s}(t_{i+1}) - \vec{s}(t_{i-1})}{2 \cdot \Delta t} \quad (39)$$

$$\vec{a}(t_i) = \frac{\vec{v}(t_{i+1}) - \vec{v}(t_{i-1})}{2 \cdot \Delta t} \quad (40)$$

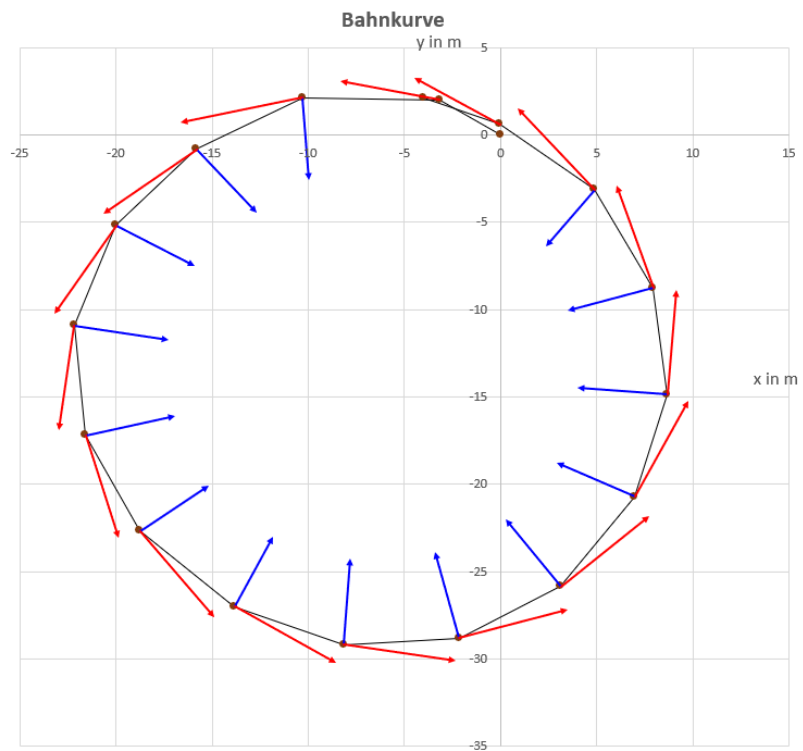


Abbildung 85 Berechnung der Vektoren aus dem vorherigen und nächstliegenden Wert (schwarz Bahnkurve, blau Beschleunigung, rot Geschwindigkeit) (dargestellt in Excel)

3.4.4.3. Einordnung in den Physikunterricht

Mit der Analyse der Kreisbewegung zerlegen die Schülerinnen und Schüler eine Bewegung in x- und y-Komponenten und berechnen die jeweiligen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Die graphischen Darstellungen der Vektoren in *Excel* machen die wirkenden Beschleunigungen deutlich.

Die Schülerinnen und Schüler entwickeln mithilfe dieses Experiments die Vorstellung, dass bei einer Kreisbewegung eine ständige Beschleunigung vorliegt und somit nur das Tempo konstant ist und nicht die Geschwindigkeit.

Neben der Erkenntnisgewinnung und dem Nutzen fachlicher Konzepte durch die Bewegungsanalyse, wird die Kommunikation mit der korrekten Verwendung von Fachbegriffen gefördert (Hessisches Kultusministerium, 2023a).

Ebenfalls kann dieses Experiment auch zur Verdeutlichung von Kräften genutzt werden. Bei der Bewegungsaufnahme kann in einer Hand das Smartphone und

in der anderen Hand das Maßband mit dem jeweiligen Radius gehalten werden. Bei der Aufnahme der Kreisbewegung mit einer geringen Bandgeschwindigkeit spürt der Schüler bzw. die Schülerin eine ständige Kraft auf dem Maßbandarm. Mit diesen Erfahrungen und den dazugehörigen Messwerten können im Unterricht die Kräfte auf den Körper und somit auch die wirkende Zentripetalkraft bestimmt und besprochen werden.

3.4.5. Weitere Möglichkeiten

Mithilfe der Bewegungsaufnahme des anrollenden Fahrrads am Berg (Abbildung 72-75) können zudem Aspekte wie Energieverlust und Reibung thematisiert werden. Hierfür wird mithilfe der Aufzeichnung die gefahrene Strecke sowie die Höhenänderung bestimmt. Wie bereits beschrieben, sind die Höhenangaben des GPS sehr ungenau und können bei großen Flächen unterschiedliche Werte anzeigen. In diesem speziellen Fall kann aber diese Ungenauigkeit aufgrund der geringen Entfernung zwischen Beginn und Ende der Messung vernachlässigt werden.

Die Hangabtriebskraft und die damit zusammenhängende Beschleunigung wird dabei wie folgt berechnet. Das addierte Gewicht des Fahrers und des Fahrrads beträgt 96 kg .

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\text{Höhenänderung}}{\text{gefahrene Strecke}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{8,68\text{m}}{86,03\text{m}}\right) = 5,79^\circ \quad (41)$$

$$F_H = m \cdot g \cdot \sin \alpha = 96\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \sin(5,79^\circ) = 59,01\text{N} \quad (42)$$

$$a_{\text{Theo}} = \frac{F_H}{m} = \frac{59,01\text{N}}{96\text{kg}} = 0,61 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (43)$$

Der berechnete Wert zeigt die theoretische Beschleunigung, die der Radfahrer ohne Reibungskräfte erfahren müsste. Die tatsächliche Beschleunigung wird über die Mittelwerte der Messung berechnet und beträgt $a_{\text{tatsächlich}} = 0,484 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Dies zeigt deutlich, dass Reibungskräfte durch Luftwiderstand und Rollreibung in der Realität eine große Rolle spielen.

Dies kann auch durch Vergleich der potenziellen Energie des Radfahrers zu Beginn der Abfahrt und der kinetischen Energie am Ende der Abfahrt gezeigt werden.

$$E_{pot_{start}} = m \cdot g \cdot h = 96 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 8,68 \text{ m} = 8174,78 \text{ J} \quad (44)$$

$$E_{kin_{Ende}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 0,5 \cdot 96 \text{ kg} \cdot \left(8,84 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 3750,99 \text{ J} \quad (45)$$

Die Skalierung wurde bewusst gewählt, um zu verdeutlichen, dass mehr als die Hälfte der ursprünglichen Energie durch Reibung verloren gegangen ist.

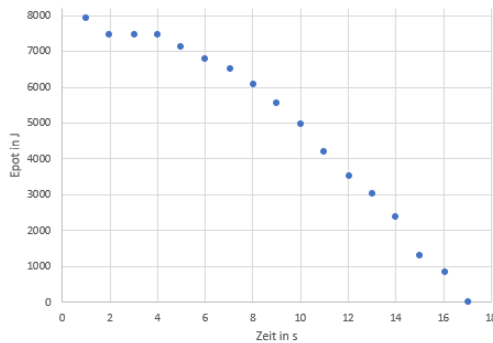


Abbildung 86 t-Epot-Diagramm: Rollmessung bergab (dargestellt in Excel)

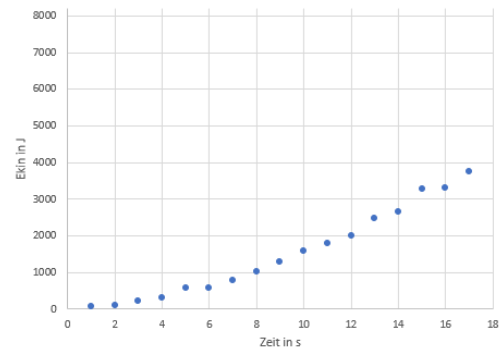


Abbildung 87 t-Ekin-Diagramm: Rollmessung bergab (dargestellt in Excel)

Eine weitere Messung zeigt das Ausrollen eines Fahrrads auf der Tartanbahn eines Sportplatzes.

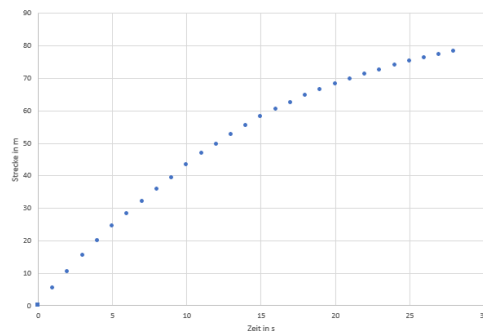


Abbildung 88 t-s-Diagramm: Ausrollen des Fahrrads auf der Tartanbahn (dargestellt in Excel)

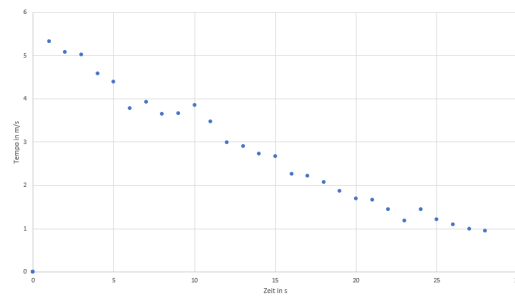


Abbildung 89 t-v-Diagramm: Ausrollen des Fahrrads auf der Tartanbahn (dargestellt in Excel)

Mit diesen Daten lässt sich die Verlustleistung. Durch Zeichnen des v-P-Diagramms wird der Strömungswiderstandskoeffizient c_w oder der Rollwiderstand F_{Roll} berechnet. Durch Vermessen einer Fotografie oder der Person selbst kann die Fläche A bestimmt werden.

$$P_{Verlust} = (F_{Luft} + F_{Roll}) \cdot v \quad (46)$$

$$P_{Verlust} = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 + F_{Roll} \cdot v \quad (47)$$

(Leider waren hierfür jedoch die Werte der Messung zu ungenau.)

3.5. Schlussbetrachtung

Neben der Vermittlung der grundlegenden Funktionsweise der satellitengestützten Navigation mittels vielfältiger und anschaulicher Methoden wie Demonstrationen, Rollenspielen oder Lehrfilmen können Experimente mithilfe digitaler Geräte den Unterricht erheblich bereichern.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Möglichkeiten gezeigt, um das GPS des Smartphones oder Tablets im Physikunterricht zur Erkenntnisgewinnung einzusetzen. Neben den vorgestellten Experimenten zur Kinematik gibt es weitere Möglichkeiten, GPS-Tracker beispielsweise in der Dynamik zu nutzen, um wirkende Kräfte zu bestimmen. Neben den physikalischen Erkenntnissen haben digitale Medien aufgrund ihres starken Praxisbezugs bei Jugendlichen einen hohen Motivationscharakter.

So sind weitere Projekte denkbar, bei denen sich die Schülerinnen und Schüler mit der Funktionsweise von Navigationsgeräten, verschiedenen Zeitsystemen oder der Entwicklung des Erdmodells beschäftigen. Des Weiteren könnten sich die Lernenden mit Problemen der relativistischen Satellitenzeit aber auch mit den Grenzen der Nutzung satellitengestützter Ortung auseinandersetzen bzw. nach weiteren Einsatzmöglichkeiten im Alltag oder als Hilfsmittel für Menschen mit eingeschränkter Orientierung suchen.

Ferner bietet das GNSS Möglichkeiten für einen fächerübergreifenden Einsatz. Im Geographieunterricht könnten z.B. die Grundlagen der Kartografie bzw. der Aufbau der Erdatmosphäre Unterrichtsthema mit praktischem Bezug sein. Ebenso könnten im Sportunterricht Aufzeichnungen von Läufen erstellt werden, um den Trainingsfortschritt zu verdeutlichen. Selbst im Kunstunterricht lassen sich, wie in Kapitel 3.4.1. gezeigt, Bilder durch Bewegung im Raum zeichnen. Nicht zuletzt könnte Geocaching, eine Schatzsuche mittels GPS, eine Alternative für Klassenausflüge darstellen, bei denen sich die Schülerinnen und Schüler in der Natur bewegen.

Vor allem, wenn digitale Geräte nicht in ausreichender Anzahl für die gesamte Klasse vorhanden sind, fördert die gemeinsame Auseinandersetzung mit der Technik die Kommunikation.

Die Nutzung digitaler Geräte im Unterricht und die Durchführung von Experimenten haben für Schülerinnen und Schüler einen hohen Aufforderungscharakter. Lehrkräfte sollten sich bei der Vorbereitung aber genau mit den Einsatzmöglichkeiten, zu erwartenden Schwierigkeiten und Grenzen der Technik auseinandersetzen. Dann können Experimente zur satellitengestützten Navigation einen Beitrag zu einem interessanten und alltagsbezogenen Physikunterricht darstellen. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

4. Literaturverzeichnis

- Die Architektur des Galileo-Systems.* (2023, 21. März).
https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Die_Architektur_des_Galileo-Systems
- Bauer, M. (2011). *Vermessung und Ortung mit Satelliten: Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme* (6., neu bearb. und erw. Aufl.). Wichmann.
- Braun, M. & Wilhelm, T [T.] (2008). Das GPS-System im Unterricht. *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule*, 57(4), 20–27.
- Dickmann, F. (2018). *Kartographie. Das geographische Seminar.* Westermann.
- Dodel, H. (2010). *Satellitennavigation* (2. Aufl.). Hüthig telekommunikation. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-79444-8>
- Galileo satellites.* (2023, 2. April). https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_satellites
- Hänel, A. (2006). Vom Sextanten zum GPS. Navigation auf der Erde. *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht*(43), Artikel 5, 9–13.
- Hessisches Kultusministerium. (2023a, 4. April). *Bildungsstandards und Inhaltsfelder - Das neue Kerncurriculum für Hessen Sekundarstufe I – Gymnasium Physik.* https://kultusministerium.hessen.de/sites/kultusministerium.hessen.de/files/2021-07/kerncurriculum_physik_gymnasium.pdf
- Hessisches Kultusministerium. (2023b, 4. April). *Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe.* <https://kultusministerium.hessen.de/sites/kultusministerium.hessen.de/files/2021-07/kcgo-ph.pdf>
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. (Hrsg.). (2017). *GNSS Technology and Applications Series. Understanding GPS/GNSS: Principles and applications.* Artech House.
- Mansfeld, W. (2010). *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme ; mit 65 Tabellen* (3. Aufl.). Praxis. Vieweg + Teubner.
- Sandoval, S. (2010). *Radar Technology.* InTech.
- Schecker, H., Wilhelm, T [Thomas], Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.). (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium,*

Referendariat und Unterrichtspraxis (1. Aufl. 2018). Springer Berlin Heidelberg. <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1607336>

Schüttler, T. (2018). *Relativistische Effekte bei der Satellitennavigation: Von Einstein zu GPS und Galileo. Essentials (Springer VS)*. Springer Vieweg. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5400018>

Zogg, J.-M. (2011). *GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten*. http://zogg-jm.ch/Dateien/Update_Zogg_Deutsche_Version_Jan_09_Version_Z4x.pdf

5. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Erdkugel (https://pixabay.com/de/illustrations/globus-erde-welt-transparenz-1348777/) [abgerufen am 22.03.2023].....	6
Abbildung 2 Rotationsellipsoid (Zogg, 2011, S. 22).....	6
Abbildung 3 lokal anschließende Ellipsoide (Bauer, 2011, S. 22).....	7
Abbildung 4 Auswahl an geodätischen Referenzmodellen (Bauer, 2011, S. 39)	7
Abbildung 5 stark übertriebenes Geoid „Potsdamer Schwerekartoffel“ (Dickmann, 2018, S. 31).....	7
Abbildung 6 geographisches Gitter (https://www.klett.de/sixcms/media.php/427/gradnetz00.jpg) [abgerufen am 21.03.2023].....	8
Abbildung 7 UTM-Gitter (https://www.dmap.co.uk/utmworld.gif) [abgerufen am 21.03.2023].....	9
Abbildung 8 Lage des UTM-Gitters in Deutschland (Dickmann, 2018, S. 110)	9
Abbildung 9 ECEF-Koordinatensystem (Bauer, 2011, S. 45)	10
Abbildung 10 ellipsoidische Höhe und orthometrische Höhe (Bauer, 2011, S. 24).....	12
Abbildung 11 ellipsoidische und orthometrische Höhen bei einer Wasseroberfläche (Bauer, 2011, S. 24)	12
Abbildung 12 Entfernungsbestimmung bei einer Signalquelle (nach Kaplan & Hegarty, 2017, S. 20).....	14
Abbildung 13 Entfernungsbestimmung bei zwei Signalquellen (nach Kaplan & Hegarty, 2017, S. 21).....	14
Abbildung 14 Entfernungsbestimmung bei drei Signalquellen (nach Kaplan & Hegarty, 2017, S. 21).....	14
Abbildung 15 Triangulierung und Quadrangulierung im Raum (Braun & Wilhelm, 2008, S. 21).....	14
Abbildung 16 Zwei-Wege-Methode und Ein-Weg-Methode (nach Mansfeld, 2010, S. 7).....	16
Abbildung 17 eindimensionale Positionsbestimmung mit Zeitfehler (nach Zogg, 2011, S. 12)	16

Abbildung 18 eindimensionale Bestimmung ohne Zeitfehler (nach Zogg, 2011, S. 13).....	16
Abbildung 19 Auswirkung des Zeitfehlers auf die Pseudostrecken (nach Kaplan & Hegarty, 2017, S. 22)	17
Abbildung 20 (a) Schwingungsdauer und (b) Wellenlänge (Bauer, 2011, S. 88)	21
Abbildung 21 Gruppen- und Phasengeschwindigkeit (Bauer, 2011, S. 96).....	21
Abbildung 22 Doppler-Kurve (Bauer, 2011, S. 95)	23
Abbildung 23 Spektrum der elektromagnetischen Wellen (https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/pmed/roe/bilder/wellenspektrum_pasca.png) [abgerufen am 21.04.2023].....	23
Abbildung 24 Aufbau der Erdatmosphäre (Bauer, 2011, S. 101)	24
Abbildung 25 Ellipse als Satellitenbahn (Bauer, 2011, S. 56)	27
Abbildung 26 räumliche Festlegung der Satellitenbahn (Bauer, 2011, S. 57).	28
Abbildung 27 Umlaufbahnen der Galileo-Satelliten (Mansfeld, 2010, S. 247).....	30
Abbildung 28 Umlaufbahnen der NAVSTAR-Satelliten (Mansfeld, 2010, S. 110).....	30
Abbildung 29 Galileo-Satellit (https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2000/10/galileo_satellite2/9235665-5-eng-GB/Galileo_satellite_pillars.jpg) [abgerufen am 02.04.2023].....	30
Abbildung 30 Einfluss der allgemeinen und der speziellen Relativitätstheorie auf Satellitenuhren (Schüttler, 2018, S. 28).....	31
Abbildung 31 Verteilung der Stationen des Bodensegmentes von Galileo (Mansfeld, 2010, S. 250)	32
Abbildung 32 Mehrwegeausbreitung (Bauer, 2011, S. 114)	34
Abbildung 33 Signalbeugung (Bauer, 2011, S. 116).....	34
Abbildung 34 Positionsfehler und Flächenfehler bei der Standortbestimmung mit zwei Entfernungen ρ_1 und ρ_1 sowie einem Satellitenwinkel von $\gamma = 90^\circ$ (Mansfeld, 2010, S. 183)	35
Abbildung 35 Positionsfehler und Flächenfehler bei der Standortbestimmung mit zwei Entfernungen ρ_1 und ρ_1 sowie einem Satellitenwinkel von $\gamma = 15^\circ$ (Mansfeld, 2010, S. 184)	35

Abbildung 36 Screenshot der phyphox-Ansicht aus dem Google Play Store (https://play.google.com/store/apps/details?id=de.rwth_aachen.phyphox&hl=de) [abgerufen am 11.04.2023]	40
Abbildung 37 Übersicht in phyphox	40
Abbildung 38 Ansicht während der Messung in phyphox	40
Abbildung 39 Screenshot der Komoot-Ansicht aus dem Google Play Store (https://play.google.com/store/apps/details?id=de.komoot.android&hl=de) [abgerufen am 11.04.2023]	41
Abbildung 40 Übersicht der Komoot App	41
Abbildung 41 Screenshot der Geo-Tracker-Ansicht aus dem Google Play Store (https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ilyabogdanovich.geotracker&hl=de&gl=US&pli=1) [abgerufen am 21.03.2023]	42
Abbildung 42 Übersicht der Geo-Tracker App	42
Abbildung 43 Einstellungsprofil der Aufzeichnung bei Geo-Tracker	42
Abbildung 44 Übersicht und Export der aufgezeichneten Routen im Geo-Tracker	43
Abbildung 45 Screenshot von GPX-Tracker aus dem App Store (https://apps.apple.com/de/app/open-gpx-tracker/id984503772) [abgerufen am 11.04.2023]	43
Abbildung 46 Übersicht im GPX-Tracker	43
Abbildung 47 Screenshot von GPS-Tracker aus dem App Store (https://apps.apple.com/de/app/gps-tracker-pro/id984920064) [abgerufen am 11.04.2023]	44
Abbildung 48 Übersicht der Aufnahmen im GPS-Tracker	44
Abbildung 49 Messinformation innerhalb der Messung im GPS-Tracker	44
Abbildung 50 Screenshot von GPS-Tracks aus dem App Store (https://apps.apple.com/de/app/gps-tracks/id425589565) [abgerufen am 11.04.2023]	45
Abbildung 51 Übersicht in GPS-Tracks	45
Abbildung 52 topographische Darstellung einer Wanderung in Google Earth (aufgenommen mit Komoot)	46
Abbildung 53 Pop-Up Fenster beim Datenimport in Google Earth	46

Abbildung 54 Zugfahrt von Gelnhausen nach Offenbach mit Höhen bzw. Geschwindigkeitsprofil und markiertem Bereich (Ansicht in Google Earth, aufgenommen mit Geo-Tracker).....	46
Abbildung 55 ungeglättete Darstellung der Zugfahrt in Excel in einem s-v-Diagramm	47
Abbildung 56 Screenshot der Webseite (https://www.j-berkemeier.de/ShowGPX.html#) [abgerufen am 11.04.2023]	47
Abbildung 57 Zugfahrt von Gelnhausen nach Offenbach mit Höhen bzw. Geschwindigkeitsprofil und markiertem Bereich (Ansicht der Webseite, aufgenommen mit Geo-Tracker) (https://www.j-berkemeier.de/ShowGPX.html#) [abgerufen am 11.04.2023]	48
Abbildung 58 Ansicht der Einstellung zur Anzeige des Zeitprofils (https://www.j-berkemeier.de/ShowGPX.html#) [abgerufen am 11.04.2023]	48
Abbildung 59 Datenbereiche Mittelwertberechnung (Screenshot Excel)	50
Abbildung 60 Formel zur Mittelwertberechnung (Screenshot Excel).....	50
Abbildung 61 Ort für Makros (Screenshot Excel).....	51
Abbildung 62 Auswahl, Ausführung und Bearbeitung von Makros (Screenshot Excel).....	51
Abbildung 63 Bild „Auto“ (dargestellt in Google Earth, aufgenommen mit Geo-Tracker).....	55
Abbildung 64 Bild „Gesicht“ (dargestellt in Google Earth, aufgenommen mit GPS-Tracker).....	55
Abbildung 65 Bild „Herz“ (Screen-shot aus der App, aufgenommen mit Geo-Tracker).....	55
Abbildung 66 Darstellung der 100 m Läufe mit verschiedenen Tempos (dargestellt in Google Earth, aufgenommen mit Geo-Tracker).....	57
Abbildung 67 t-s-Diagramm: 100 m schnelles Tempo (Sprint), mittleres Tempo (Joggen), langsames Tempo (Gehen) (dargestellt in Excel).....	57
Abbildung 68 t-v-Diagramm: 100 m schnelles Tempo (Sprint), mittleres Tempo (Joggen), langsames Tempo (Gehen) (dargestellt in Excel)	57

Abbildung 69 s-v-Diagramm: 100 m schnelles Tempo (Sprint), mittleres Tempo (Joggen), langsames Tempo (Gehen) (dargestellt in Excel)	57
Abbildung 70 t-s-Diagramm: 400 m Fahrradfahren (dargestellt in Excel)	58
Abbildung 71 t-v-Diagramm: 400 m Fahrradfahren (dargestellt in Excel)	58
Abbildung 72 bergab rollen mit dem Fahrrad (dargestellt in Google Earth, aufgenommen mit Geo-Tracker)	61
Abbildung 73 t-s-Diagramm: bergab rollen (dargestellt in Excel)	61
Abbildung 74 t-v-Diagramm: bergab rollen (dargestellt in Excel)	61
Abbildung 75 t-a-Diagramm: bergab rollen (dargestellt in Excel)	61
Abbildung 76 t-s-Diagramm: Zugfahrt (dargestellt in Excel)	62
Abbildung 77 t-v-Diagramm: Zugfahrt (dargestellt in Excel)	62
Abbildung 78 t-v-Diagramm: Beschleunigungs- und Bremsvorgang Zug (dargestellt in Excel)	62
Abbildung 79 t-a-Diagramm: Beschleunigungs- und Bremsvorgang Zug (dargestellt in Excel)	62
Abbildung 80 Ausschnitt Autofahrt: Abstände der Messpunkte werden nach Verlassen der Ortschaft größer, demnach steigt das Tempo. (dargestellt in Google Earth, aufgenommen mit Geo-Tracker)	63
Abbildung 81 t-v Diagramm: konstantes Tempo bei Kreisbewegung (dargestellt in Excel)	65
Abbildung 82 Ortsänderung der Kreisbewegung (dargestellt in Excel)	66
Abbildung 83 Ortsänderung und der Geschwindigkeitsvektoren der Kreisbewegung (dargestellt in Excel)	66
Abbildung 84 Ortsänderung mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren, berechnet jeweils aus dem vorherigen Abschnitt (dargestellt in Excel)	66
Abbildung 85 Berechnung der Vektoren aus dem vorherigen und nächstliegenden Wert (blau Beschleunigung, rot Geschwindigkeit) (dargestellt in Excel)	67
Abbildung 86 t-Epot-Diagramm: Rollmessung bergab (dargestellt in Excel)	69
Abbildung 87 t-Ekin-Diagramm: Rollmessung bergab (dargestellt in Excel)	69
Abbildung 88 t-s-Diagramm: Ausrollen des Fahrrads auf der Tartanbahn (dargestellt in Excel)	69

Abbildung 89 t-v-Diagramm: Ausrollen des Fahrrads auf der Tartanbahn (dargestellt in Excel).....	69
Abbildung 90 Störquellen durch äußere Einflüsse (Mansfeld, 2010, S. 177) ..	80

6. Anhang

I. Abbildungen

Lfd. Nr.	Art des Spektrums	Typische Quelle
1	Breitbandiges Signal mit Gaußscher Verteilung, ohne Modulation	Absichtlich erzeugtes Störsignal (zum Beispiel militärisch oder terroristisch)
2	Breitbandiges Spektrum: Hochfrequenter Träger mit breitbandiger Modulation, insbesondere Amplitudenmodulation	Harmonische der Sendefrequenzen von TV-Sendern, bandnahe Frequenzen von Richtfunksendern bei unzureichender Selektion an Bandgrenzen der Empfängereingangsfiler
3	Breitbandiges Spreizspektrum	Absichtlich erzeugtes Störsignal (zum Beispiel militärisch oder terroristisch), Nahfeldstörungen von Pseudoliten
4	Breitbandige Impulsfolge	Frequenzband der Radarsender
5	Schmalbandiges Spektrum: Hochfrequenter Träger mit schmalbandiger Modulation, insbesondere Frequenz- und Phasenmodulation	Harmonische der Sendefrequenzen von Hörfunksendern, Harmonische der Sendefrequenzen der Basisstationen von Mobilfunknetzen, Harmonische der Sendefrequenzen von Teilnehmern in Mobilfunknetzen
6	Schmalbandiges Spektrum: Hochfrequenter Träger mit periodisch veränderlicher Frequenz mit schmalbandiger Modulation	Absichtlich erzeugtes Störsignal (sweep-generator), dessen Spektrum dem zu störenden System angepasst ist (zum Beispiel militärisch oder terroristisch)
7	Schmalbandiges Spektrum: Hochfrequenter Träger mit periodisch veränderlicher Frequenz ohne Modulation	Signale: funktechnische Geräte

Abbildung 90 Störquellen durch äußere Einflüsse (Mansfeld, 2010, S. 177)

II. Inhalt der beiliegenden CD

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Blanko-*Excel*-Dateien befinden sich auf der beiliegenden CD im Ordner „Vorlagen für Auswertung“.

In dem Ordner „Durchgeführte Messungen“ befinden sich alle in der Arbeit genutzten Messreihen, sowie die jeweiligen Auswertungen in *Excel*.

III. Programmcode für Excel Makros

V_Vektoren

```
Sub V_Vektoren()
```

```
    Dim chartObj As ChartObject
```

```
    Dim chartSeries As Series
```

```
    Dim i As Integer
```

```
    Dim lastRow As Long
```

```
    ' Verweis auf das Diagramm im Arbeitsblatt "Mittelwerte"
```

```
    Set chartObj = Worksheets("Mittelwerte").ChartObjects("Darstellung")
```

```
    With chartObj.Chart
```

```
        ' Schleife durch alle Reihen der Tabelle "vVektor"
```

```
        lastRow = Worksheets("vVektor").Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
```

```
        For i = 2 To lastRow
```

```
            ' Erstellen einer neuen Datenreihe in dem Diagramm
```

```
            Set chartSeries = .SeriesCollection.NewSeries
```

```
            chartSeries.Name = Worksheets("vVektor").Cells(i, 1).Value
```

```
            chartSeries.XValues = Array(Worksheets("vVektor").Cells(i, 2).Value, Worksheets("vVektor").Cells(i, 3).Value)
```

```
            chartSeries.Values = Array(Worksheets("vVektor").Cells(i, 4).Value, Worksheets("vVektor").Cells(i, 5).Value)
```

```
            ' Einstellen der Farbe und Form des Vektors
```

```
            chartSeries.MarkerStyle = xlMarkerStyleNone
```

```
            chartSeries.Format.Line.EndArrowheadStyle = msoArrowheadTriangle
```

```
            chartSeries.Format.Line.ForeColor.RGB = RGB(255, 0, 0)
```

```
        Next i
```

```
    End With
```

```
End Sub
```

A_Vektoren

```
Sub A_Vektoren()
```

```
    Dim chartObj As ChartObject
```

```
    Dim chartSeries As Series
```

```
    Dim i As Integer
```

```
    Dim lastRow As Long
```

```
    ' Verweis auf das Diagramm im Arbeitsblatt "Mittelwerte"
```

```
    Set chartObj = Worksheets("Mittelwerte").ChartObjects("Darstellung")
```

```
    With chartObj.Chart
```

```
        ' Schleife durch alle Reihen der Tabelle "aVektor"
```

```
        lastRow = Worksheets("aVektor").Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
```

```
        For i = 2 To lastRow
```

```
            ' Erstellen einer neuen Datenreihe in dem Diagramm
```

```
            Set chartSeries = .SeriesCollection.NewSeries
```

```
            chartSeries.Name = Worksheets("aVektor").Cells(i, 1).Value
```

```
            chartSeries.XValues = Array(Worksheets("aVektor").Cells(i, 2).Value,  
Worksheets("aVektor").Cells(i, 3).Value)
```

```
            chartSeries.Values = Array(Worksheets("aVektor").Cells(i, 4).Value, Worksheets("aVektor").Cells(i,  
5).Value)
```

```
            ' Einstellen der Farbe und Form des Vektors
```

```
            chartSeries.MarkerStyle = xlMarkerStyleNone
```

```
            chartSeries.Format.Line.EndArrowheadStyle = msoArrowheadTriangle
```

```
            chartSeries.Format.Line.ForeColor.RGB = RGB(0, 0, 255)
```

```
        Next i
```

```
    End With
```

```
End Sub
```