

Satellitenortung realitätsnah im Klassenzimmer nachempfunden

Tobias Schüttler*, Peter Groll* und Raimund Girwidz*

*Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstraße 37, 80333 München
Tobias.Schuettler@lmu.de, Peter.Groll@lmu.de und Girwidz@lmu.de

Kurzfassung

Die Satellitenortung, umgangssprachlich auch oft als Satellitennavigation bezeichnet, ist eine Raumfahrttechnologie, die sich innerhalb eines Jahrzehnts, insbesondere durch die rasche Entwicklung entsprechend kleiner Empfangsgeräte und Smartphones, in vielen Bereichen unseres Alltags etabliert hat. Das physikalische Grundprinzip ist zwar relativ einfach, die technische Umsetzung jedoch überaus komplex. Da Physikunterricht, insbesondere in Bundesländern ohne speziellen Technikunterricht, auch die Aufgabe hat, moderne Technologien zu vermitteln, gab es bereits einige Bemühungen, Satellitenortung verständlich, auch über experimentelle Aufbauten, für Schülerinnen und Schüler zugänglich zu machen. Das hier vorgestellte Experimentierset NaviSat schafft einen sehr realitätsnahen Zugang zur Satellitenortung. Erstmals wurde damit ein auf digital kodierte akustischen Signalen basiertes Satellitenortungssystem für den Physikunterricht realisiert. Die Genauigkeit der Ortung liegt auch nach längerem Betrieb im Zentimeterbereich. Im praktischen Einsatz hat sich das Set mit Lehrer- und Schülergruppen aus verschiedenen Bundesländern bereits gut bewährt. Pünktlich zur Inbetriebnahme des Europäischen Satellitenortungssystems Galileo bietet NaviSat damit die Möglichkeit, diese anspruchsvolle aber auch faszinierende Technologie in adäquater Komplexität, verständlich und praktisch zu unterrichten.

1. Satellitenortung im Unterricht

Satellitenortung bezeichnet das Verfahren der Orts- und Zeitbestimmung mit Hilfe von Satelliten. Diese sind Bestandteile von so genannten globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS) wie dem US-amerikanischen GPS oder dem Europäischen Galileo System.

In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Möglichkeiten vorgeschlagen, wie diese für den Alltag mittlerweile überaus relevante Technologie einerseits verständlich erklärt werden, andererseits aber auch im Physikunterricht als Messverfahren genutzt werden kann. Im Folgenden wird auf den erstgenannten Aspekt eingegangen. Zu Möglichkeiten der Nutzung von GPS-Empfängern als Messinstrument im Physikunterricht, siehe u.a. Backhaus & Gabriel (2011) oder Braun & Wilhelm (2008).

Müller (2008) zeigt einen Weg, wie die Funktionsweise des Global Positioning Systems anhand von einfachen Prinzipien und geometrischen Betrachtungen in sechs Schritten theoretisch nachvollzogen werden kann. Experimentelle Verfahren spielen bei dieser Herangehensweise, wenn überhaupt, nur eine sehr untergeordnete Rolle. Bei Priemer et al. (2009) hingegen findet man einen experimentellen Aufbau, welcher das der Satellitenortung zugrunde liegende physikalische Grundprinzip, die Messung von Signallaufzeiten, mit akustischen Signalen veranschaulicht. Der Versuchsaufbau auf einer großen Tischplatte ermöglicht dabei eine zentimetergenaue Ortung in drei Dimensionen. Von einer zentralen Steuer- und Messeinheit werden die Signale (Töne) generiert, über Lautsprecher ausgesendet und von einem Mikrofon empfangen. Aus den gemessenen

Signallaufzeiten ergeben sich die drei Schrägentfernungen L_i ($i = 1, \dots, 3$) zwischen den fest installierten Lautsprechern und dem Mikrofon:

$$L_i = c \cdot \Delta t_i = c \cdot (t_{\text{empfangen}} - t_{\text{gesendet}})$$

Die gesuchten Empfängerkoordinaten x_E , y_E und z_E hängen mit der Schrägentfernung aus Gründen der Geometrie wie folgt zusammen:

$$L_i = \sqrt{(x_i - x_E)^2 + (y_i - y_E)^2 + (z_i - z_E)^2}$$

Das so erhaltene Gleichungssystem aus drei Positionsgleichungen für die drei Unbekannten x_E , y_E und z_E kann auf Grund des vereinfachten Aufbaus auf einer Tischplatte mit Sendern auf den Koordinatenachsen leicht elementar gelöst werden und liefert die Empfängerposition.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Tobias & Heering (2010), mit einem ebenfalls auf akustischen Signalen basierenden Modellversuch, welcher die Möglichkeit bietet die Satellitenortung zweidimensional im Klassenzimmer, also einem deutlich größeren Raum, nachzuempfinden.

Bei der Evaluierung des darauf basierenden Unterrichtsgangs konnte das Thema „Satellitennavigation“ als interessant für Schülerinnen und Schüler der Mittelstufe identifiziert werden. Es zeigte sich zudem, dass die Probanden der Studie zu einem großen Teil kein adäquates Vorwissen über die Funktionsweise von Satellitenortungssystemen mitbringen. Eine Behandlung dieses gesellschaftsrelevanten Themas im Unterricht erscheint daher angebracht. Allerdings zeigte sich auch, dass sogar nach dem Unterricht zur Satellitennavigation die Hälfte der Probanden nach wie vor an gravierenden Fehlvorstellungen festhielt. Dies könnte zum einen an der

Komplexität und Neuheit des Themas zum anderen aber auch an der kurzen Dauer des Unterrichtsgangs liegen. Um ein tiefgehendes Verständnis der Thematik zu erlangen erscheint es daher nötig, sich intensiv damit auseinanderzusetzen.

Die angesprochenen Versuchsaufbauten unterscheiden sich in einigen Punkten stark von echten GNSS. Neben dem Informationsträger (Schall statt elektromagnetischer Wellen) unterscheidet sich auch das Ortungsverfahren. Dies wird besonders dadurch deutlich, dass zum Senden und Empfangen des Signals ein und dieselbe Steuerungseinheit verwendet wird. Zudem übertragen die Sender lediglich eine Zeitmarke aber keine Nachricht. Beides entspricht bei genauerer Betrachtung eher einer Entfernungsmessung „von außen“ – ähnlich, wie wenn eine äußere Instanz die Laufzeit der Signale vom Satelliten zum Empfänger messen könnte. Auf diese Weise wird ein zentraler physikalischer Aspekt der echten Satellitenortung, nämlich die Notwendigkeit der Uhrensynchronisation, umgangen.

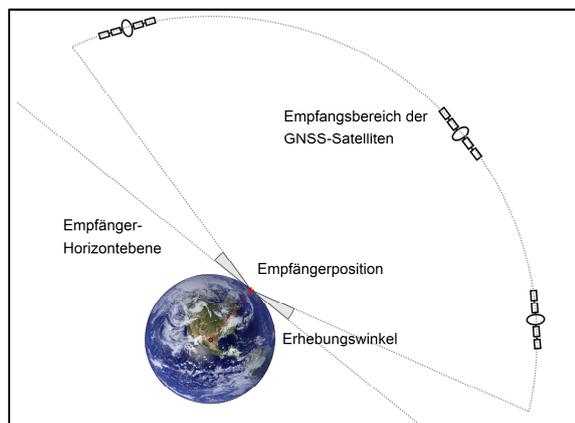


Abbildung 1: Zur Ortung verwendete Satelliten befinden sich immer über der Horizontebene.

Die Wahl der Senderpositionen auf den Achsen eines Koordinatensystems führt zwar zu einer vereinfachten Auswertung aber auch zu einem Verlust an Realitätsbezug: Echte GNSS Satelliten müssen sich oberhalb der Empfängerhorizontebene befinden, um überhaupt empfangen werden zu können. Mansfeld (2013) gibt unter Berücksichtigung von atmosphärischen Störungen einen minimalen Erhebungswinkel von etwa 15° an (Abbildung 1). Die Kenntnis, dass sich die zur Ortung genutzten Satelliten in diesem Sinne immer „über“ dem Empfänger befinden, wird bei der Berechnung der Empfängerposition genutzt, um Mehrdeutigkeiten auszuschließen.

2. Satellitenortung – prinzipielle Funktionsweise

Die Technik von GNSS wie GPS und Galileo ist im Detail sehr komplex und verbindet viele verschiedenen Fachdisziplinen wie Physik, Mathematik, Nachrichtentechnik, Raumfahrttechnik und viele mehr. Einen leicht verständlichen Überblick gibt Schüttler (2014), deutlich tiefere Betrachtungen findet man beispielsweise bei Mansfeld (2013). Im Fol-

genden sollen nur wenige, für das Verständnis des vorgestellten Analogieexperiments wichtige, Aspekte kurz beleuchtet werden.

GNSS werden üblicherweise untergliedert in das Navigations- und anderen Satelliten bestehende Raumsegment, in ein Bodensegment, welches alle Kontrollstationen umfasst, und das Nutzersegment (Abbildung 2). Die Satelliten senden digital kodierte Signale aus, im Falle von GPS und Galileo erfolgt die Modulation der Nachricht durch so genannte Phasenumtastung (eng. Binary Phase Shift Keying, BPSK). Dabei bedeutet ein Phasensprung von 180° im Signal den Wechsel von 0 und 1. Um die einzelnen Satelliten zu unterscheiden und um das sehr schwache Signal aus dem Hintergrundrauschen überhaupt herausfiltern zu können werden für jeden Satelliten spezifische, so genannte Gold-Codes verwendet. Die Gold-Codes haben eine hohe Autokorrelation bei gleichzeitig sehr geringer Kreuzkorrelation und damit ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis.

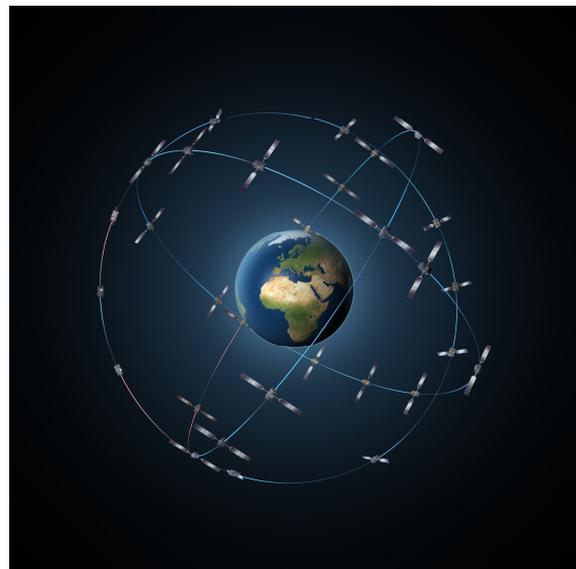


Abbildung 2: Raumsegment: Satellitenkonstellation des Galileo Systems. Quelle: ESA

Der zivile Code des GPS hat eine Länge von 1023 Bit (auch als Chips bezeichnet) und bei einer Übertragungsrate von 1,023 Mchip/s eine Dauer von 1 ms. Bei Galileo ist die Codelänge auf Grund des komplexen Modulationsverfahrens (Binary Offset Carrier, kurz BOC-Verfahren) unterschiedlich. Für das Frequenzband E1, welches mit einer Mittenfrequenz von 1575,42 MHz mit dem zivilen L1-Band des GPS identisch ist, wird ein $4 \cdot 1023 = 4092$ Chips langer Datenkode verwendet. Hinzu kommt im selben Frequenzband ein so genanntes „Pilot-Signal“ mit einer Länge von $100 \cdot 1023 = 102300$ Chips, welches keine Nachricht enthält und lediglich als sehr störsicheres Signal für die Laufzeitmessung dient (Flühr, 2013).

Die von jedem Satelliten übertragene Navigationsnachricht (Super-Frame) ist bei GPS zusammenge-

setzt aus 25 Frames, welche wiederum untergliedert sind in je 5 Subframes. Diese beinhalten eine Datenmenge von jeweils 300 Bit, wodurch sich bei einer Übertragungsrates von 50 Bit/s eine Übertragungsdauer von 6 Sekunden pro Subframe ergibt. Mit dem ersten Subframe werden bei allen Frames insbesondere Parameter zur Korrektur der Laufzeitverzögerung und zur Korrektur der Satellitenzeit, des empfangenen Satelliten übertragen. Die anderen Subframes enthalten die Ephemeridendaten des empfangenen sowie Almanachdaten je eines anderen Satelliten. Durch den Empfang eines vollständigen Frames erhält der Empfänger demnach die Positionsdaten und die Zeitparameter des jeweiligen Satelliten.

Die Aufteilung der Nachricht ermöglicht eine sehr schnelle Ortung, wenn die Ephemeridendaten aller Satelliten bereits bekannt sind. Ist dies, beispielsweise bei einem „Kaltstart“ nicht der Fall, muss der gesamte Superframe mit einer Datenmenge von 37,5 kbit empfangen werden, was 12,5 Minuten dauert.

Die Signallaufzeit wird ermittelt, indem ein im Empfänger generiertes, den Satellitensignalen identisches Signal so lange zeitlich verschoben wird, bis sich eine maximale Korrelation mit dem empfangenen Signal einstellt. Die Zeitspanne, um welche das Empfängersignal verschoben wurde, entspricht dabei der Differenz aus Sendezeitpunkt des jeweiligen Satellitensignals und Empfangszeitpunkt im Empfänger $\Delta\tilde{t}_i$. Die Schrägentfernung zum i -ten Satelliten erhält man durch Multiplikation mit der Lichtgeschwindigkeit:

$$r_i = c \cdot \Delta\tilde{t}_i$$

Durch den Empfang der Daten und der Zeitsignale von mindestens vier Satelliten kann der Empfänger seine Position bestimmen:

$$(c \cdot \Delta\tilde{t}_i)^2 = (x_i - x_E)^2 + (y_i - y_E)^2 + (z_i - z_E)^2$$

Dabei sind zwei Punkte zu berücksichtigen:

- Da die Empfängeruhr im Gegensatz zu den Senderuhren für eine präzise Ortung viel zu ungenau ist, beinhaltet das Gleichungssystem nicht nur die drei Ortskoordinaten des Empfängers als Unbekannte, sondern auch dessen Uhrenfehler Δt_E . Es ist also: $\Delta\tilde{t}_i = \Delta t_i + \Delta t_E$ mit der tatsächlichen Signallaufzeit Δt_i . Zur Lösung des Gleichungssystems sind daher vier Gleichungen und entsprechend die Messung der Daten von vier Satelliten erforderlich.
- Das quadratische Gleichungssystem hat eine zweideutige Lösung (\cong Wurzelterm). Allerdings kann die zweite Lösung verworfen werden, da sich die zugehörige Empfängerposition im Weltall „hinter“ den Satelliten befände.

Die Lösung der Ortsgleichungen kann analytisch, in geschlossener Form angegeben werden. Da hierbei jedoch durch die Wurzelausdrücke nach mehrmaliger Berechnung immer größere Fehler auftreten, ist

ein iterativer Lösungsalgorithmus nach vorangegangener Linearisierung des Gleichungssystems üblicher. Anschaulich, geometrisch betrachtet entspricht die Lösung des Gleichungssystems der Ermittlung des Schnittpunktes von vier Kugeloberflächen (vgl. Abbildung 3).

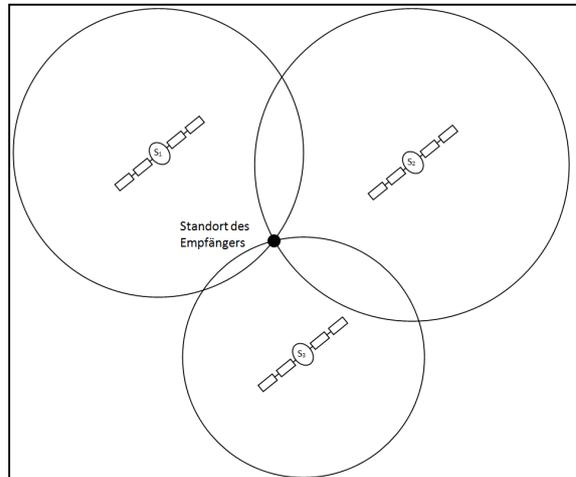


Abbildung 3: Die Lösung der Positionsgleichungen kann in der Ebene geometrisch als Schnitt von Positionskreisen bzw. im Dreidimensionalen von Kugelschalen interpretiert werden.

Die Ortung ist wie jede Messung fehlerbehaftet, wobei doch bemerkenswert ist, wie genau man mit diesem Verfahren die Empfängerposition bestimmen kann. Navigationssatelliten befinden sich mit Bahnhöhen über 20.000 km im mittleren Erdorbit und übertragen ihre Nachrichten mit Funksignalen, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Beim Durchdringen der Ionosphäre werden die Signale gebrochen, was dazu führt, dass der Ausbreitungsweg nicht geradlinig ist. Eine andere Störung entsteht durch Mehrwegeeffekte: Wenn das Signal an sehr glatten Flächen, wie beispielsweise Hauswänden, reflektiert wird, entstehen im Empfänger Mehrdeutigkeiten, welche zur einer weniger genauen Ortung führen. Eine weitere Fehlerquelle entsteht durch die jeweilige vom Empfänger aus beobachtete Satellitengeometrie: Stehen die Satelliten zu dicht beieinander bedeutet dies einen ungünstigen Geometriefaktor (GDOP), was zu einer ungenauen Messung führt.

Die genannten Fehlerquellen sind maßgeblich dafür verantwortlich, dass man mit vier GPS-Satelliten alleine nur auf etwa 10 - 15 Meter genau orten kann. Eine höhere Präzision wird durch die Nutzung von mehr als vier Satelliten zur Fehlerausgleichsrechnung bei den Mehrweg- und Geometriefehlern erreicht. Die ionosphärische Brechung kann anhand von Daten über den Zustand der Ionosphäre (Ionosphären Index) oder durch die Verwendung eines zweiten Signals mit einer anderen Frequenz, wie bei Galileo, korrigiert werden. Dadurch können GNSS-Empfänger Ortungen mit Genauigkeiten um 5 Meter durchführen.

Eine kritische Komponente stellen auf Grund der hohen Anforderungen an die Präzision der Laufzeitmessung die Satellitenuhren dar. Diese sind hochgenaue Atomuhren mit Abweichungen von nur etwa 10^{-14} . Größere Fehler bei den Satellitenuhren führen zu unbrauchbaren Messungen, weshalb sie vom Bodensegment sehr genau überwacht werden. Eine Besonderheit des Galileo Systems wird es sein, dass durch ein sehr engmaschiges Netz an Kontrollstationen, Nutzer innerhalb von maximal 6 Sekunden eine Information über die Systemintegrität erhalten werden. Dies ist bei GPS bislang noch nicht der Fall – eine entsprechende Information darüber, ob ein Satellit, beispielsweise wegen eines Uhrenfehlers, unbrauchbare Signale aussendet, erhält man hier erst nach einigen Stunden.

Die Anforderungen an die Satellitenuhren sind so hoch, dass auch relativistische Effekte, welche auf Grund der Bahnhöhe (Gravitationspotential) und der Geschwindigkeit auftreten, berücksichtigt werden. Hierzu werden die Uhrenfrequenzen nach folgender Formel korrigiert (vgl. Giorgi et al., 2016):

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)(r) = -\left(\frac{3GM}{2ac^2} + \frac{\Phi_E}{c^2}\right) + \frac{2GM}{c^2}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r}\right)$$

Dabei ist Δf die relativistische Frequenzverschiebung der Grundfrequenz f , G die Gravitationskonstante, M die Masse der Erde, c die Lichtgeschwindigkeit, a die große Halbachse der Satellitenbahn, r der momentane, also zeitabhängige, Abstand des Satelliten vom Gravitationszentrum und Φ_E das effektive Gravitationspotential der Erde.

Ohne diese Korrektur würde sich die relativistische Uhrendrift der Satellitenuhren auf knapp $40 \mu\text{s}$ pro Tag gegenüber Referenzuhren auf der Erde summieren. Eine Panne beim Start der ersten beiden Galileo-FOC Satelliten (Full Operational Capability), 2014, konnte genutzt werden, um die relativistischen Einflüsse auf die Satellitenuhren direkt zu untersuchen. Die Satelliten Doresa und Milena (E14 und E18) wurden auf Grund eines Fehlers in der Oberstufe der Trägerrakete in einen falschen, stark elliptischen Orbit eingeschossen. Ihre Uhren zeigen nach aktuellen Messungen mit einer Abweichung von Bruchteilen einer Nanosekunde das in der obigen Formel beschriebene Verhalten. Details zu den relativistischen Effekten bei der Satellitenortung findet man bei Schüttler (2018).

3. NaviSat – ein realitätsnahes Analogieexperiment zur Satellitenortung im Klassenzimmer

Bereits die hier nur sehr oberflächliche Behandlung der Satellitenortung zeigt die Komplexität der Technologie auf. Um die ihr aus Sicht der Autoren inwohnende Faszination für Unterrichtszwecke zugänglicher zu machen, wurde im Rahmen des am Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der LMU München durchgeführten Projektes SatTec, das Analogieexperiment „NaviSat“ entwickelt. Dabei wurde großer Wert darauf gelegt, die Funktionswei-

se von echten Satellitenortungssystemen möglichst realitätsnah abzubilden.

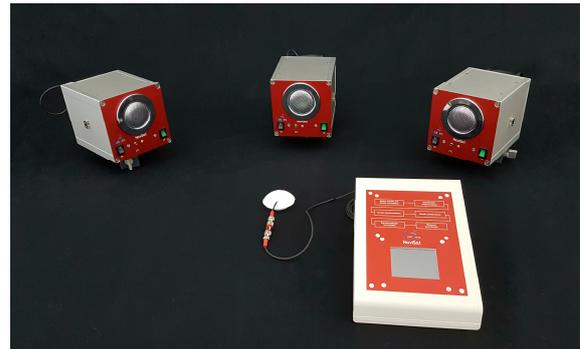


Abbildung 4: Das NaviSat System besteht im Wesentlichen aus drei Sendern (Satelliten) und einer zentralen multifunktionalen Kontrollstation

Das System besteht aus drei unabhängigen, durch Akkus mit Energie versorgten Sendern ($\hat{=}$ Satelliten), einer zentralen Kontrollstation, welche in Verbindung mit dem Ortungsmikrofon auch als Empfänger fungiert, sowie dem benötigten Kleinmaterial, wie Anschlusskabeln und einem Ladegerät (Abbildung 4). In einem stabilen Transportkoffer verpackt wird es nach einer ausgiebigen Erprobungs- und Optimierungsphase Schulen kostenfrei, leihweise zur Verfügung gestellt. Zu diesem Zweck werden derzeit zehn Sets produziert, welche voraussichtlich Ende 2018 verfügbar sein werden.

Jeder Sender überträgt eine akustische, hörbare, digital kodierte Navigationsnachricht bestehend aus der jeweiligen Sendernummer, den zugehörigen, zuvor einzuprogrammierenden Koordinaten, x_i , y_i und z_i , ($i = 1, \dots, 3$), der Systemzeit in Minuten, eines Zeitkorrekturparameters und einer Prüfsumme (Abbildung 5).

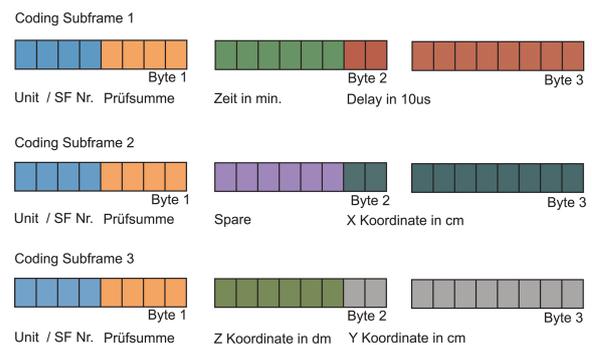


Abbildung 5: Navigationsnachricht eines Senders

Die Nachricht (ein Frame) eines Senders besteht aus drei Subframes. Diese werden in Zeitabständen von 15 Sekunden ausgesendet und bestehen aus je drei Byte Dateninhalt, welche sich jeweils in zwei 4 Bit große, sogenannte „Nibble“ unterteilen (Abbildung 6).

Die kleinste Informationseinheit von 4 Bit ergibt sich aus dem Kodierungsverfahren. Dabei musste von der bei echten GNSS genutzten Phasenumtastung abgewichen werden, da sich diese bei akusti-

schen Signalen als zu empfindlich gegenüber Reflexionen des Signals an Oberflächen herausstellte. Außerdem erwies sich das BPSK Signal als sehr unangenehm anzuhören und somit für den Unterricht ungeeignet. Die Übertragung der Navigationsnachricht erfolgt bei NaviSat durch kurze Sendephasen und nachfolgende Pausen. Das akustisch übertragene Signal ist digital frequenzmoduliert auf Basis von vier Frequenzen (1, 2, 3 und 4 kHz).

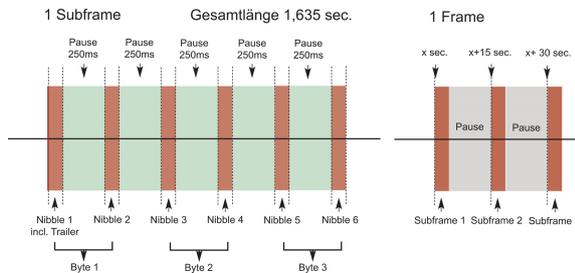


Abbildung 6: Zusammensetzung der Nachricht in 3 Subframes. Diese beinhalten 3 Byte an Information.

Es werden dabei vier unterschiedliche Sinustöne mit einer Gesamtdauer von 65 ms erzeugt. Das Signal ist immer aus einer bestimmten Reihenfolge aller vier Frequenzen zusammengesetzt und nutzt $4! = 24$ möglichen Permutationen (ohne Wiederholung) zur Datenkodierung (Abbildung 7).

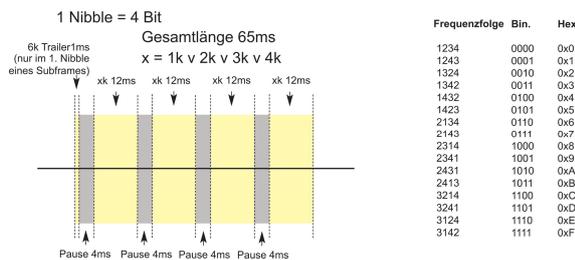


Abbildung 7: Signalkodierung mit vier unterschiedlichen Frequenzen. Von den 24 möglichen Permutationen werden nur 16 (4Bit) genutzt.

Um den Signalbeginn eindeutig zu identifizieren, wird im ersten Nibble jedes Subframes ein 1 ms langes Trailersignal mit einer Frequenz von 6 KHz übertragen. Mittels dieses Trailers kann der Empfangszeitpunkt mit einer Genauigkeit besser 0,01 ms bestimmt werden. Nachdem der Empfänger das komplette Signal empfangen hat, beginnt er die Nachricht zu dekodieren.

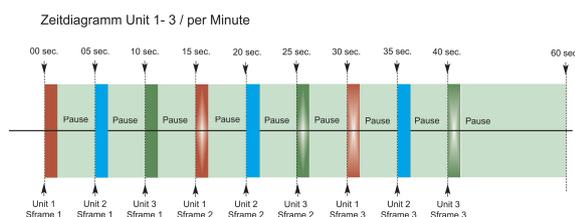


Abbildung 8: Zeitliche Abfolge des NaviSat Signals.

Die für die Ortung notwendige Kenntnis der Signallaufzeit erhält der Empfänger also aus dem Trailer Signal. Die Sender senden ihre Signale in einer genau festgelegten zeitlichen Reihenfolge.

(Abbildung 8). Die Uhren aller Sender (Satelliten) werden vor der Messung synchronisiert.

Nach dem Empfang der Daten von allen drei Sendern hat der Empfänger somit Kenntnis über deren Position im Raum (Koordinaten x_i , y_i und z_i , $i = 1, \dots, 3$) und die jeweiligen Signallaufzeiten Δt_i . Multipliziert mit der Schallgeschwindigkeit in Luft ($c \approx 340 \text{ m/s}$) ergeben sich daraus die Schrägentfernungen r_i und letztlich die Empfängerposition.

4. NaviSat – GNSS: Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Das Ortungsverfahren des Analogieexperiments NaviSat entspricht weitestgehend dem echter GNSS: Die Messung des Empfängers ist vollkommen autonom, d.h. es gibt keinerlei Verbindung vom Empfänger zum Sender. Es findet nur einseitige Kommunikation (Empfang!) zwischen beiden statt. Dieser Punkt ist besonders hervorzuheben, da eine verbreitete Fehlvorstellung darin besteht, dass GNSS-Empfänger in irgendeiner Form mit den Satelliten kommunizieren würden (vgl. Tobias & Heering, 2010). Es handelt sich jedoch dabei um Systeme, bei welchen lediglich Datenempfang stattfindet.

Die Navigationsnachricht des NaviSat ist von der Grundstruktur her der von GNSS recht ähnlich. Der Datengehalt ist hier, den Anforderungen angepasst, deutlich geringer. Als Modulationsverfahren erwies sich eine Phasenumtastung für akustische Signale als zu störeffend und für den Unterricht ungünstig. Insbesondere unvermeidliche Reflexionen des Schalls im Raum führten bei Probemessungen zu unbrauchbaren Ergebnissen. Es wurde daher ein eigenständiges Modulationsverfahren auf Basis von vier diskreten Frequenzen völlig neu entwickelt.

Bei GNSS ist der Empfang des Signals auf Grund der äußerst geringen Intensität von lediglich etwa 10^{-16} W/m^2 nur durch spezielle Verfahren (Autokorrelation) möglich. Analog dazu musste auch beim NaviSat durch die Signalstruktur und die Filterung im Empfänger sichergestellt werden, dass die Informationen trotz allenthalben vorhandener Störgeräusche und Reflexionen empfangen werden können.

Die Hauptfehlerquellen bei der Satellitenortung sind die ionosphärische Refraktion, Mehrwegeeffekte und bei ungünstigen Konstellationen auch die Satellitengeometrie (GDOP).

Die beiden letztgenannten Fehlerquellen spielen auch beim Analogieexperiment eine große Rolle. So sollte beim Aufbau der Sender im Klassenzimmer darauf geachtet werden, dass deren Positionen sinnvoll, also möglichst ähnlich einer echten Satellitenkonstellation gewählt werden. Reflexionen, insbesondere in der Nähe des Empfänger-mikrofons, können die Dauer bis zur Ortung, ähnlich wie bei GPS, erheblich erhöhen. Mit dem NaviSat System wird eine Ortungsgenauigkeit von 3-5 cm angestrebt und auch erreicht

Ebenso wie bei der Satellitenortung auch, hat die Ganggenauigkeit der Senderuhren eine entscheidende Bedeutung. Das NaviSat System ist so konzipiert, dass die Ortung auch noch nach einer längeren Betriebszeit auf wenige Zentimeter genau erfolgen kann. Hierzu sind Uhren erforderlich, welche in einer Stunde eine Drift aufweisen, die im ungünstigsten Fall im Bereich von Zehntel Millisekunden liegen darf. Das bedeutet eine Ganggenauigkeit im Bereich von 10^{-7} (ein Zehntel ppm). Erreicht wird diese Genauigkeit durch hochwertige, temperaturkompensierte Schwingquarze (TCXO), welche zusätzlich bei der Herstellung der Sender mit einem beheizten Quarzoszillator (OCXO) kalibriert werden. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Senderuhren, beispielsweise während einer Doppelstunde Physikunterricht, immer noch ausreichend stabil laufen.

5. Einsatz und Experimentiermöglichkeiten

Mit dem NaviSat System können verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden durchgenommen werden. Die Ortung kann dabei vollkommen automatisch erfolgen, es können aber auch nur teilweise oder gänzlich unverarbeitete Rohdaten ausgegeben werden, aus welchen dann von den Lernenden selbst die Position bestimmt wird.

Die Messung unterscheidet sich zudem darin, ob zuvor die Senderuhren mit der Empfängeruhr synchronisiert wurden oder nicht. Im erstgenannten Fall kann mit den drei Sendern eine dreidimensionale Ortung im Raum erfolgen, ist die Empfängeruhr asynchron, also fehlerbehaftet, können mit NaviSat zwei Ortskoordinaten und die Systemzeit bestimmt werden.

Die einfachst denkbare Messung besteht in einer eindimensionalen Ortung auf einer Achse mit vorheriger Uhrensynchronisation. Das System besteht dann lediglich aus einem Sender und der Empfangseinheit. Vor der Messung wird ein willkürlich gewählter Ursprung des sodann verwendeten Koordinatensystems festgelegt, von dem aus der Abstand des Senders gemessen wird. Der Sender wird mittels des Touchscreens der Kontrollstation programmiert, wobei seine späteren Koordinaten (in diesem Fall lediglich die x-Koordinate) übertragen und die Uhren synchronisiert werden.

Anschließend wird der Sender von der Kontrollstation getrennt und mit Stativmaterial an seine Position gestellt. Von dort aus überträgt er nun seine Koordinaten, welche vom Ortungsmikrofon an der Kontrollstation aufgenommen werden. Die Daten werden nun automatisch dekodiert und daraus die Empfängerposition berechnet. Da die Rechnung sehr einfach ist, kann sie problemlos auch von den Lernenden vorgenommen werden. Sie erhalten dazu in der etwas schwierigeren Variante lediglich die gemessene Signallaufzeit und führen die Berechnung selbst durch. Alternativ kann die Ortung auch geo-

metrisch als Schnitt des Positionskreises mit der gewählten Achse erfolgen, wofür sich besonders dynamische Geometriesoftware (DGS) eignet (Abbildung 9).

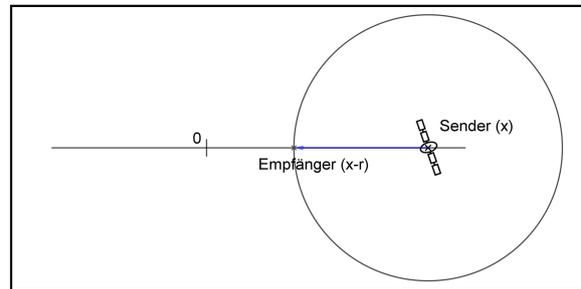


Abbildung 9: Eindimensionale Ortung auf einer Achse.

Im nächsten Schritt, erfolgt eine zweidimensionale und eine dreidimensionale Ortung nach Uhrensynchronisation. Während erstgenannte ebenfalls noch recht einfach rechnerisch oder geometrisch selbst ausgewertet werden kann ist das Lösen der drei quadratischen Gleichungen im dreidimensionalen Fall anspruchsvoll und daher Lernenden mit entsprechenden mathematischen Fähigkeiten vorbehalten. Eine dreidimensionale Auswertung mit entsprechender Geometriesoftware befindet sich derzeit im Entwicklungsstadium.

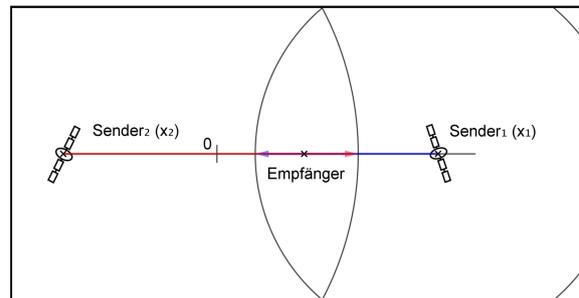


Abbildung 10: Eindimensionale Ortung mit einer vorgehenden Empfängeruhr. Die Signallaufzeiten werden überschätzt. Durch sukzessive Anpassung der Radien ($\hat{=}$ Synchronisieren der Uhr) wird die Empfängerposition geometrisch bestimmt.

Als etwas forderndere Aufgabe, kann die Synchronisation der Empfängeruhr nachempfunden werden. Hierzu kann ebenfalls DGS verwendet werden. Abbildung 10 zeigt, dass sich bei einer vorgehenden Empfängeruhr mit zwei Sendern kein gemeinsamer Schnittpunkt ergibt, da die Signallaufzeiten überschätzt werden. Dieser Fehler kann behoben werden, indem man die Radien der Positionskreise sukzessive um denselben Wert so lange verkleinert, bis sich die Kreise in einem Punkt auf der Achse schneiden. Praktisch kann man dies einfach durch Nutzung eines Schiebereglers in der DGS realisieren. Der Wert Δr , um welchen die Radien korrigiert werden müssen, ist proportional zum Uhrenfehler der Empfängeruhr:

$$\Delta r = c \cdot \Delta t_E$$

Das gleiche Prinzip kann mit dem NaviSat System auch noch für eine zweidimensionale Ortung mit nicht synchronisierter Empfängeruhr genutzt werden. Dabei ergeben sich dann drei Positionskreise ohne gemeinsamen Schnittpunkt, welche ebenfalls mittels DGS sehr gut visualisiert werden können (Abbildung 11). Alternativ kann auch das Gleichungssystem gelöst werden, was allerdings recht anspruchsvoll ist.

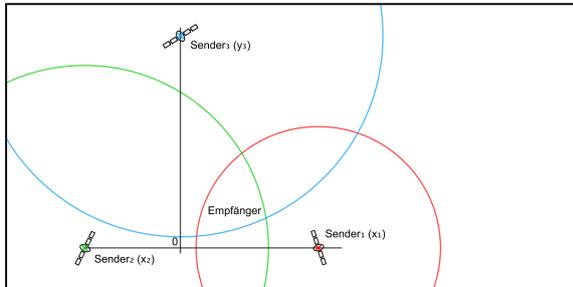


Abbildung 11: Zweidimensionale Ortung mit asynchroner Empfängeruhr: Die Positionskreise haben keinen gemeinsamen Schnittpunkt. Die Radien werden so lange um denselben Betrag verkleinert, bis sich alle drei Kreise in einem Punkt schneiden. Dieser ist die Empfängerposition. Der Wert, um welchen die Radien verkleinert wurden, wird verwendet um die Empfängeruhr zu synchronisieren.

Die aktuelle Version des NaviSat Systems bietet neben verschiedenen Test- und Präsentationsmodi auch noch die Möglichkeit, eine oder mehrere Senderuhren nach einem einstellbaren Schema vorgehen zu lassen. Auf diese Weise kann der große Einfluss der Messgenauigkeit auf das Ortungsergebnis sehr gut nachvollzogen werden. Diese Einstellung setzt bereits einige Erfahrung mit dem System, insbesondere mit der korrekten Positionierung der Sender voraus, da es wichtig ist, die Messungen korrekt zu interpretieren.

Die vorgestellten Funktionen wurden und werden derzeit im DLR_School_Lab, dem Schülerlabor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen mit Schüler*innen der Mittel- und Oberstufe ausgiebig erprobt. Ziel der Erprobung ist zum einen, technische Schwierigkeiten zu identifizieren und zu beheben, zum anderen aber insbesondere auch die Ausarbeitung, Erprobung und Optimierung einer verständlichen und möglichst selbst-erklärenden Versuchsbeschreibung.

6. Weitere Ziele und Ausblick

Das NaviSat System wurde mittlerweile erfolgreich mit einer Vielzahl von Schülerinnen und Schülern sowie Lehrkräften durchgeführt und wurde dabei generell sehr gut angenommen. Eine systematische Evaluierung eines entsprechenden Unterrichtsgangs hinsichtlich der zu vermittelnden Kompetenzen und Lernziele steht aber derzeit noch aus. Zuvor werden noch weitere Tests nötig sein. So soll unter anderem die Frage, inwiefern und wie realitätsnah eine relativistische Uhrendrift mit dem System nachgestellt werden kann, noch genauer untersucht werden.

Ein weiterer Aspekt, der zurzeit noch erprobt wird, ist die mögliche Nutzung von Smartphones als Empfänger. Dies würde das Experiment für die beteiligten Schüler noch interaktiver machen. In der derzeitigen Fassung besteht bereits die Möglichkeit, alle Anzeigen der Kontrollstation über USB und ein entsprechendes Monitorprogramm auf einen PC und schließlich zum Beamer zu übertragen (Abbildung 12).

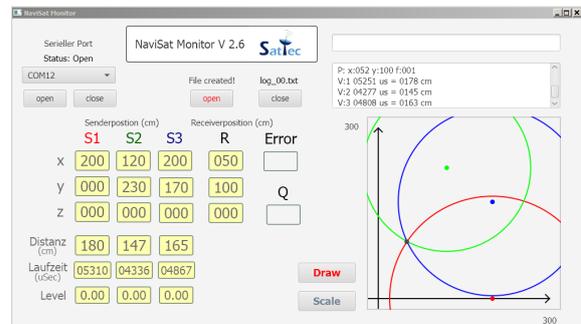


Abbildung 12: NaviSat-Monitorprogramm.

Die Durchführung einer Ortung mit dem eigenen Smartphone würde die Lernenden allerdings noch wesentlich stärker in das Geschehen einbinden.

Ein denkbarer „Spinn-Off“ des Systems ist die Möglichkeit, grundlegende Experimente zur digitalen Nachrichtenübertragung durchzuführen. Die Dekodierung des Signals kann ähnlich wie beim Morsemithilfe einer Kodetabelle erfolgen.

Für die Übergabe der zehn derzeit in Produktion befindlichen Sets an Schulen ist Ende 2018 eine Lehrerfortbildung vorgesehen – Interessenten daran sind herzlich eingeladen, den Hauptautor dieses Beitrags zu kontaktieren. Letztlich wird erst der Einsatz der Sets im echten Unterrichtsgeschehen aufzeigen, welche Anpassungen noch zu erfolgen haben, um die Satellitennavigation tatsächlich ins Klassenzimmer zu bringen. Im Alltag ist sie längst angekommen. Aus Sicht der Autoren ist es auch eine wichtige Aufgabe des Physikunterrichts, die Grundlagen moderner Technik verständlich und fachlich korrekt zu erklären. Das NaviSat System soll dabei helfen, dies im Falle der Satellitennavigation auf eine interessante und experimentell nachvollziehbare Art und Weise zu tun.

7. Literatur

- [1] Braun, M. & Wilhelm, T. (2008). Das GPS-System im Unterricht. Praxis der Naturwissenschaften–Physik in der Schule, 57(4), 20-27.
- [2] Backhaus, U., & Gabriel, P. (2011). Einsatzmöglichkeiten moderner GPS-Geräte im Mechanikunterricht. PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung.
- [3] Flühr, H. (2013). Avionik und Flugsicherungstechnik: Einführung in Kommunikationstechnik, Navigation, Surveillance. Springer-Verlag.
- [4] Giorgi, G., Lülff, M., Günther, C., Herrmann, S., Kunst, D., Finke, F. & Lämmerzahl, C. (2016).

- Testing general relativity using Galileo satellite signals. SignalProcessing Conference (EUSIPCO), 2016 24th European (pp. 1058-1062). IEEE.
- [5] Mansfeld, W. (2013). *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. Springer-Verlag.
- [6] Müller, R. (2008): Physik schafft Orientierung. Das Global Positioning System (GPS). *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik* 19/105-106, S. 89-91
- [7] Priemer, B., Schmidt, T. & Sniezyk, J. (2009). GPS-Navigation – ein akustisches Analogieexperiment. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 6/62, 346-350
- [8] Schüttler, T. (2014). *Satellitenavigation: Wie sie funktioniert und wie sie unseren Alltag beeinflusst*. Springer-Verlag.
- [9] Schüttler, T. (2018). *Relativistische Effekte bei der Satellitenavigation – Von Einstein zu GPS und Galileo*. Springer-Verlag.
- [10] Tobias, V. & Heering, P. (2010). SCHULPRAXIS-Satellitenavigation im Klassenraum. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht*, 63(1), 16.

Danksagung

Das Projekt SatTec, zu dem die vorliegende Arbeit zuzuordnen ist, wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Förderkennzeichen 50RO1601 gefördert. Den Projektpartnern des DLR gilt ein herzlicher Dank für die konstruktive Diskussion und die Unterstützung bei der Erprobung des entwickelten Konzeptes im Schülerlabor.