



Tobias Schüttler (tobias.schuettler@lmu.de)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



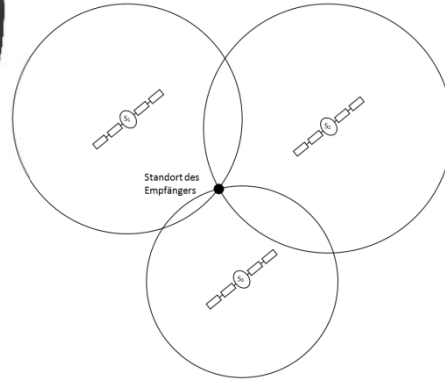
LUDWIG-  
MAXIMILIANS-  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN



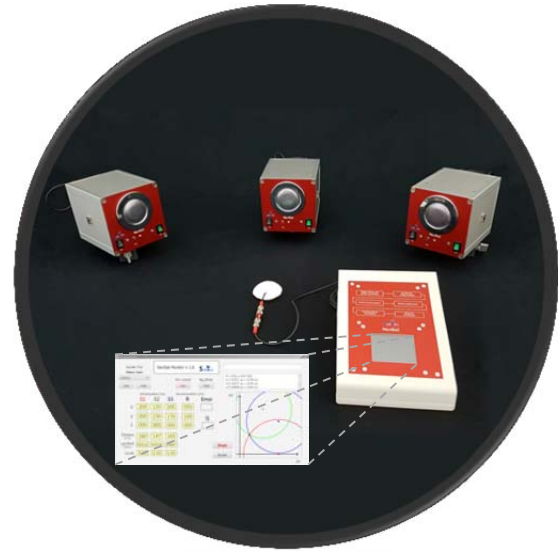
# NaviSat – ein realitätsnahes Hightech-Analogieexperiment



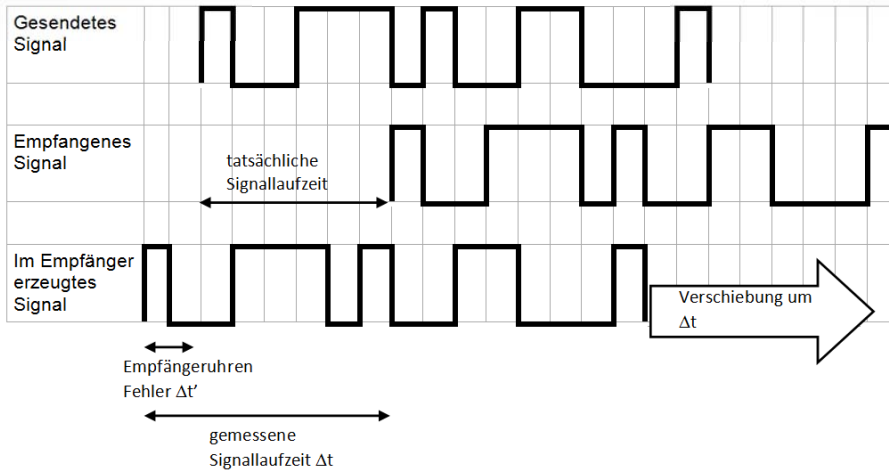
Galileo



Trilateration



NaviSat



Laufzeitmessung

Rahmen: 1500 bit ~ 30 s																																																	
Unterrahmen 1: 300 bit ~ 6 s										Unterrahmen 2: 300 bit ~ 6 s										Unterrahmen 3: 300 bit ~ 6 s										Unterrahmen 4: 300 bit ~ 6 s										Unterrahmen 5: 300 bit ~ 6 s									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
TLM	HOW	Zeitkorrektur								TLM	HOW	Bahndaten des empfangenen Satelliten								TLM	HOW	Bahndaten des empfangenen Satelliten								TLM	HOW	codierte Nachrichten								TLM	HOW	Almanach und Zustandsangabe							
1 Nibble = 4 Bit 6k Trailer 1ms (nur im 1. Nibble eines Subrahmens) Gesamtlänge 65ms x = 1k v 2k v 3k v 4k xk 12ms xk 12ms xk 12ms xk 12ms Pause 4ms Pause 4ms Pause 4ms Pause 4ms										Frequenzfolge Bin. Hex 1234 0000 0x0 1243 0001 0x1 1324 0010 0x2 1342 0011 0x3 1432 0100 0x4 1423 0101 0x5 2134 0110 0x6 2143 0111 0x7 2314 1000 0x8 2341 1001 0x9 2431 1010 0xA 2413 1011 0xB 3214 1100 0xC 3241 1101 0xD 3124 1110 0xE 3142 1111 0xF										1 Subframe Pause 250ms Gesamtlänge 1,635 sec. Nibble 1 Nibble 2 Nibble 3 Nibble 4 Nibble 5 Nibble 6 Sub 1 Sub 2 Sub 3										1 Frame x sec. ++15 sec. ++30 sec. Pause Pause Subframe 1 Subframe 2 Subframe 3										Coding Subframe 1 Byte 1 Byte 2 Byte 3 Zeit in min. Delay in 10us Coding Subframe 2 Byte 1 Byte 2 Spare X Koordinate in cm Coding Subframe 3 Byte 1 Byte 2 Y Koordinate in dm. X Koordinate in cm									

## Digitale Nachrichtenübertragung

$$(x_E - x_i)^2 + (y_E - y_i)^2 + (z_E - z_i)^2 = c^2(\Delta t_i + \Delta t_E)^2, \quad i = 1, \dots, 4$$

$$\Rightarrow x_E, y_E, z_E \text{ \& } \Delta t_E$$

## NaviSat: 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 (Abbildung 1). Die noch recht junge Technik hat mittlerweile Einzug in viele Bereiche unseres Alltags genommen und entwickelt sich nach wie vor sehr rasant weiter. Um die Funktionsweise von GNSS im Detail besser verständlich und experimentell erfahrbar zu machen, wurde im SatTec Projekt das NaviSat Experimentierset entwickelt. Es bildet ein komplettes Satellitennavigationssystem wie Galileo im Kleinen nach und liefert einen verständlichen Zugang zu dieser spannenden Technologie.

## Satellitenortung – ein kurzer Überblick

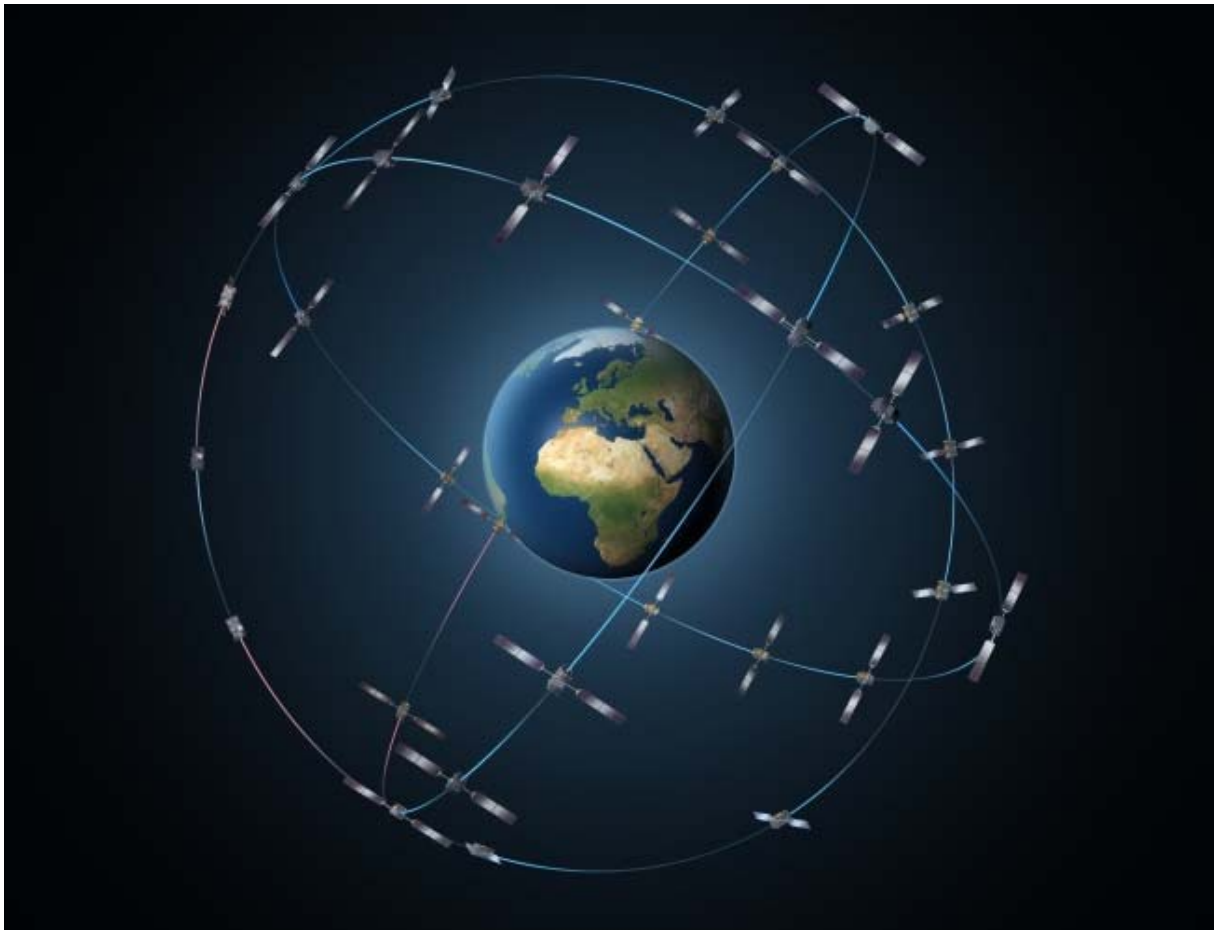


Abbildung 1: Raumsegment: Satellitenkonstellation des Galileo Systems. Quelle: ESA

GNSS werden üblicherweise untergliedert in das aus Navigations- und anderen Satelliten bestehende Raumsegment, in ein Bodensegment, welches alle Kontrollstationen umfasst, und das Nutzersegment. Die Satelliten senden digital kodierte Signale aus, welche die so

genannte Navigationsnachricht beinhalten. Durch deren Empfang erhält der Empfänger die Positionsdaten und die Zeitparameter der Satelliten.

Durch Messung der Signallaufzeit vom Satelliten zum Empfänger wird der Abstand der einzelnen Satelliten vom Empfänger und damit letztlich die Empfängerposition bestimmt. Geometrisch kann man sich das wie folgt vorstellen: Der Empfänger befindet sich im Abstand  $r_i$  von den Satelliten. Das bedeutet, dass seine mögliche Position, von einem einzelnen Satelliten aus gesehen, auf der Oberfläche einer Kugel um den Satelliten im Abstand  $r_i$  liegt. Die Empfängerortung kann man demnach geometrisch als Schnitt von vier Kugeloberflächen betrachten (Abbildung 2).

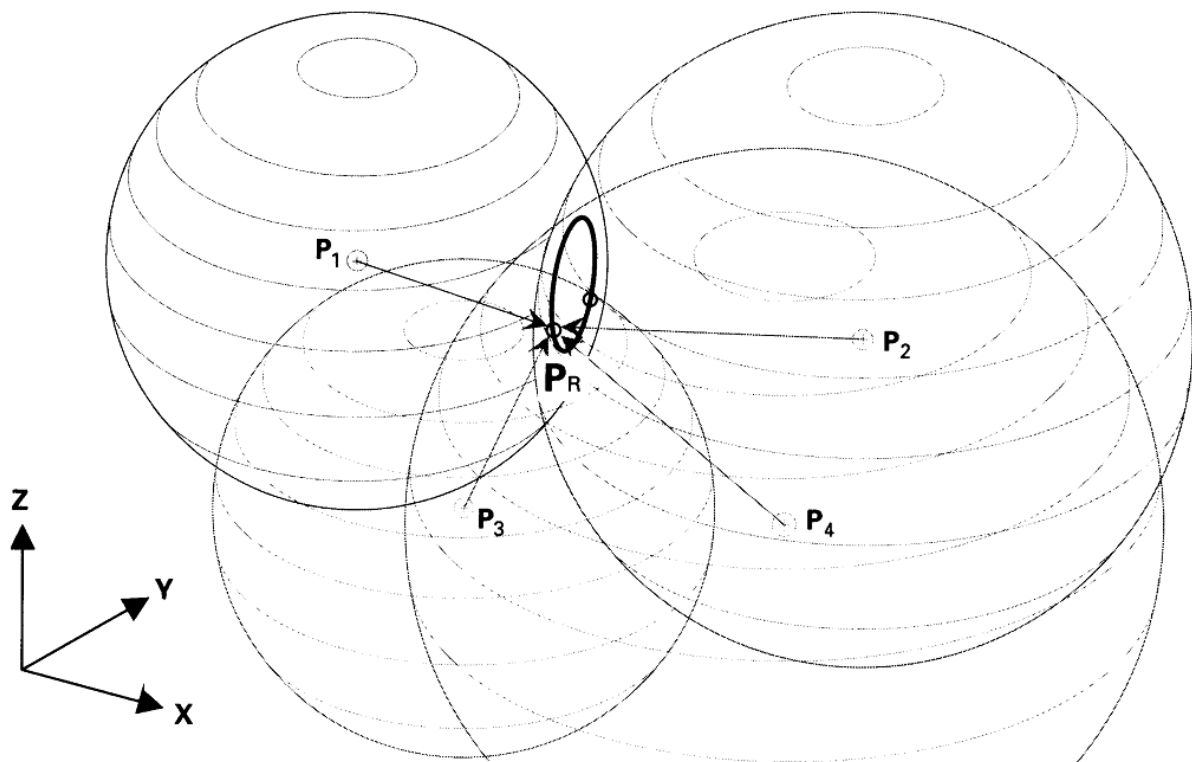


Abbildung 2: Die Empfängerortung kann geometrisch als Schnitt von Kugelschalen interpretiert werden. Quelle: DLR

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 vom Satelliten empfangenen Signal einstellt. Die Zeitspanne, um welche das Empfängersignal verschoben wurde, entspricht dabei der Differenz aus Sendezeitpunkt des jeweiligen Satellitensignals und Empfangszeitpunkt im Empfänger. Allerdings ist es für eine

exakte Ortung unerlässlich, dass alle verwendeten Uhren genau gleich, also synchron, laufen.

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. Die Anforderungen an die Satellitenuhren sind so hoch, dass auch relativistische Effekte, welche auf Grund der Bahnhöhe (Gravitationspotential) und der Geschwindigkeit auftreten, berücksichtigt werden.

### NaviSat – ein Experimentierset zur Satellitenortung im Klassenzimmer

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. In einem stabilen Transportkoffer verpackt wird es nach einer ausgiebigen Erprobungs- und Optimierungsphase Schulen kostenfrei, leihweise zur Verfügung gestellt.

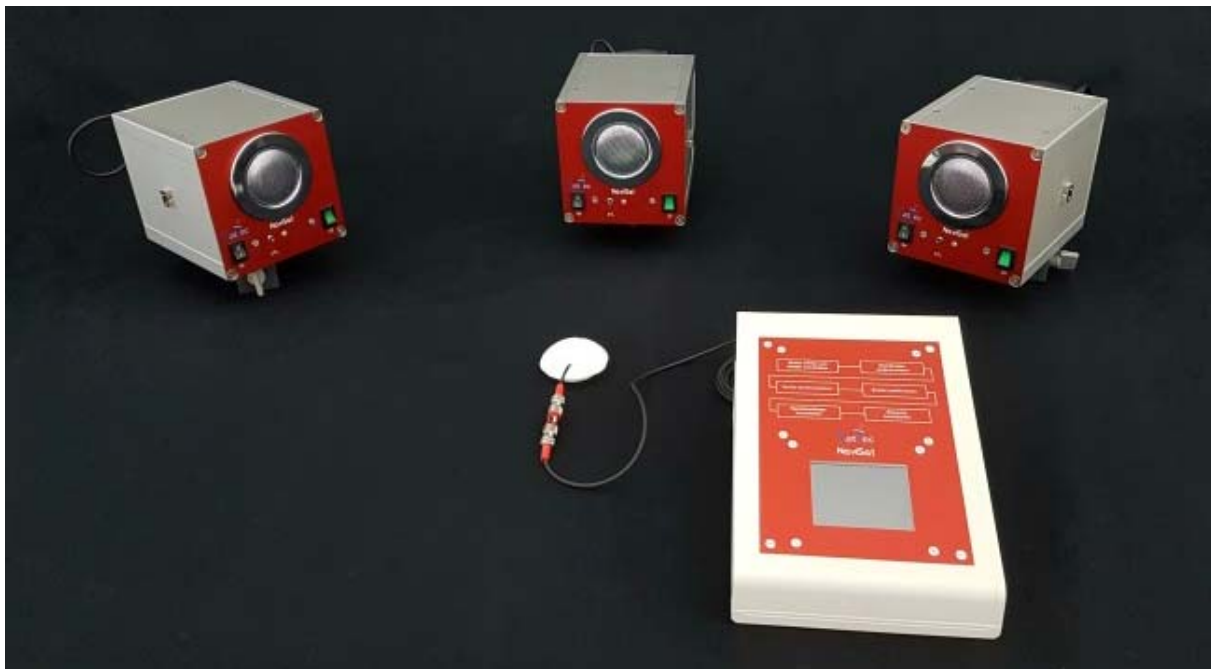


Abbildung 3: Das NaviSat System besteht im Wesentlichen aus drei Sendern (Satelliten) und einer zentralen multifunktionalen Kontrollstation.

Die Funktionsweise orientiert sich stark an der echter GNSS, mit dem Unterschied, dass der Fokus in erster Linie auf Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit gelegt wurde. Jeder

Sender überträgt eine akustische, hörbare, digital kodierte Navigationsnachricht bestehend aus der jeweiligen Sendernummer, den zugehörigen, zuvor einzuprogrammierenden Koordinaten,  $x$ ,  $y$  und  $z$  und der Systemzeit sowie Korrekturparametern. Die Uhren aller Sender werden vor der Messung synchronisiert. Nach dem Empfang der Daten von allen drei Sendern hat der Empfänger Kenntnis über deren Position im Raum und die jeweiligen Signallaufzeiten. Multipliziert mit der Schallgeschwindigkeit in Luft ergeben sich daraus die Schrägentfernungen und letztlich die Empfängerposition.

Das Ortungsverfahren des 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. Die Navigationsnachricht ist bei NaviSat von der Grundstruktur her der von GNSS sehr ähnlich. 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. Daher kommen Uhren zum Einsatz, welche in einer Stunde eine Drift aufweisen, die im ungünstigsten Fall im Bereich von Zehntel Millisekunden liegt.

### Einsatz und Experimentiermöglichkeiten

Mit dem NaviSat System können verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden behandelt werden. Die Ortung kann dabei vollkommen automatisch erfolgen, es können aber auch nur teilweise oder gänzlich unverarbeitete Rohdaten ausgegeben werden, aus welchen dann von

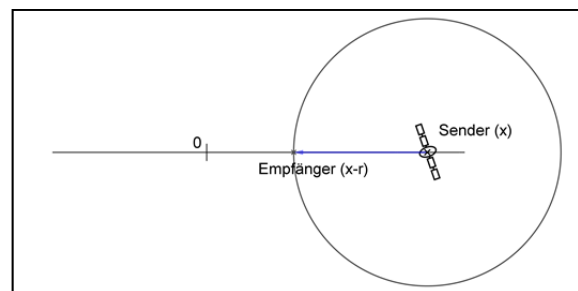


Abbildung 4: Eindimensionale Ortung auf einer Achse.

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 (Abbildung 4). Das System besteht dann lediglich aus einem Sender und der Empfangseinheit. 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.

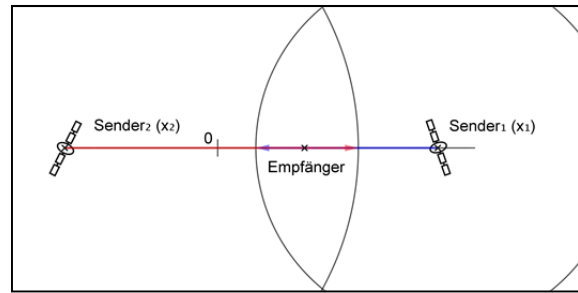


Abbildung 5: Eindimensionale Ortung mit einer vorgehenden Empfängeruhr. Die Signallaufzeiten werden überschätzt. Durch sukzessive Anpassung der Radien ( $\hat{=}$  Synchronisieren der Uhr) wird die Empfängerposition geometrisch bestimmt.

Im nächsten Schritt, erfolgt eine zweidimensionale und eine dreidimensionale Ortung nach Uhrensynchronisation mit geometrischer Auswertung. Als etwas forderndere Aufgabe, kann die Synchronisation der Empfängeruhr nachempfunden werden. Abbildung 5 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.

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 (Abbildung 6).

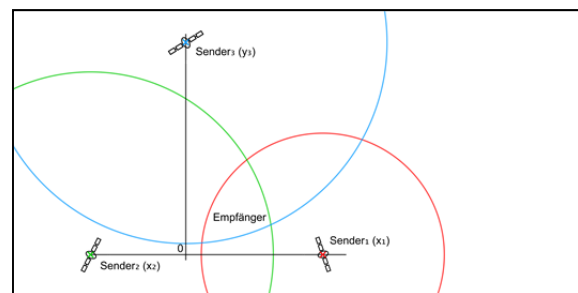


Abbildung 6: Zweidimensionale Ortung mit asynchroner Empfängeruhr: Die Positionskreise haben keinen gemeinsamen Schnittpunkt. Die Radien werden so lange um denselben Betrag verkleinert, bis sich alle drei Kreise in einem Punkt schneiden. Dieser ist die Empfängerposition. Der Wert, um welchen die Radien verkleinert wurden, wird verwendet um die Empfängeruhr

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. Für die Übergabe der zehn derzeit in Produktion befindlichen Sets an Schulen ist Ende 2018 eine Lehrerfortbildung vorgesehen – Interessenten daran sind herzlich eingeladen, das SatTec Projektteam zu kontaktieren.

Das Projekt SatTec, zu dem die vorliegende Arbeit zuzuordnen ist, wird mit Mitteln des Bundes-Ministeriums für Wirtschaft und Energie durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Förderkennzeichen 50RO1601 gefördert.

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

## Abbildungen

Abbildung 1: Satellitenkonstellation des Galileo Systems. Quelle: ESA.....	2
Abbildung 2: Empfängerortung geometrisch. Quelle: DLR .....	3
Abbildung 3: Das NaviSat System.....	4
Abbildung 4: Eindimensionale Ortung auf einer Achse.....	5
Abbildung 5: Eindimensionale Ortung mit einer vorgehenden Empfängeruhr .....	6
Abbildung 6: Zweidimensionale Ortung mit asynchroner Empfängeruhr .....	6