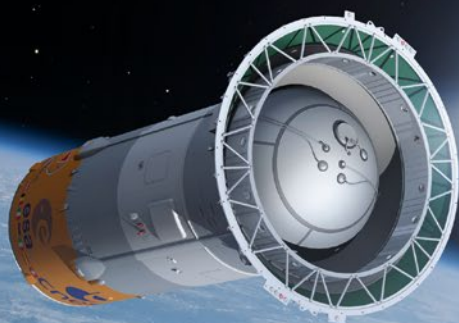


Tobias Schüttler

Satelliten- navigation



Wie sie funktioniert
und wie sie unseren Alltag
beeinflusst

SACHBUCH



Springer

Technik im Fokus

Die Buchreihe Technik im Fokus bringt kompakte, gut verständliche Einführungen in ein aktuelles Technik-Thema.

Jedes Buch konzentriert sich auf die wesentlichen Grundlagen, die Anwendungen der Technologien anhand ausgewählter Beispiele und die absehbaren Trends.

Es bietet klare Übersichten, Daten und Fakten sowie gezielte Literaturhinweise für die weitergehende Lektüre.

Tobias Schüttler

Satellitenavigation

Wie sie funktioniert und wie sie
unseren Alltag beeinflusst

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

 Springer

Tobias Schüttler
Habach, Deutschland

ISSN 2194-0770

ISSN 2194-0789 (electronic)

Technik im Fokus

ISBN 978-3-662-58050-9

ISBN 978-3-662-58051-6 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58051-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2014, 2022
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Michael Kottusch

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Danksagung

Ich danke den Lektorinnen und Lektoren des Springer Verlages für ihre Geduld und ihre professionelle Unterstützung. Meiner Frau Lisa danke ich dafür, dass sie mir den Freiraum geschaffen hat, der erforderlich war, um mich mit diesem spannenden Thema auseinanderzusetzen.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundprinzipien der Satellitennavigation	1
2	Das erste Satellitenortungssystem: Transit	29
3	NAVSTAR GPS	45
4	GLONASS	107
5	Galileo	119
6	Anwendungen der Satellitennavigation	139
	Literatur	163



Grundprinzipien der Satellitennavigation

1

Das Wort Satellitennavigation wird meist als eine Art Überbegriff verwendet, bezeichnet jedoch eigentlich zwei unterschiedliche Dinge: neben der Ortung, also dem Ermitteln der eigenen Position, mit Hilfe von Satellitentechnologie, bedeutet Navigation eine Hilfe bei der Fortbewegung hin zu einem bestimmten Ziel. In der Umgangssprache ist damit aber meist beides, also die Satellitenortung und die Satellitennavigation gemeint, was streng genommen nicht ganz exakt ist. Da sich das vorliegende Buch jedoch in erster Linie nicht an derart spezialisiertes Fachpublikum wendet, welches sich an dieser Unsauberkeit stören könnte, sondern eher an Leser, deren Fokus in erster Linie auf allgemeiner Verständlichkeit liegt, ohne dabei auf den Anspruch auf prinzipielle fachliche Korrektheit zu verzichten, sei diese kleine Unsauberkeit verziehen.

Überhaupt möchte ich darauf hinweisen, dass jede Art von didaktischer Rekonstruktion, also letztlich der Versuch des Verständlich Machens von komplizierten Inhalten, immer die Gefahr in sich trägt, nicht jede denkbare Eventualität zu berücksichtigen, stellenweise lediglich auf Prinzipien zu verweisen und letztlich der Komplexität eines Sachverhaltes nicht vollständig gerecht zu werden. Daher halte ich es für angebracht, einleitend zu klären, was Sie von diesem Buch erwarten können und was nicht (Tab. 1.1).

Tab. 1.1 Zum Inhalt dieses Buches

Das dürfen Sie erwarten	Das dürfen Sie nicht erwarten
<ul style="list-style-type: none"> • Verständliche, weitgehend formelfreie Darstellung der prinzipiellen Funktionsweise der Satellitenortung • Beschreibung einer ganzen Reihe von Anwendungen aus unterschiedlichen Gebieten • Einblicke in eine faszinierende Technologie, welche ohne die Erkenntnisse der modernen Naturwissenschaften undenkbar wäre 	<ul style="list-style-type: none"> • Herleitungen der Formeln, welche bei der Satellitennavigation eine Rolle spielen • Exakte Beschreibung und Erklärung der Empfänger- und Antennentechnik • Mathematische Berechnungen jenseits der Grundrechenarten • Politische Hintergründe zu Galileo • Eine Anleitung zum Geo-caching und anderen Aktivitäten mit Satellitennavigationsempfängern

1.1 Ein Mitmachexperiment zum Einstieg

Das grundlegende Funktionsprinzip der Satellitennavigation ist schnell erklärt – am besten ist es, wenn man dieses Prinzip gemeinsam mit ein paar (mindestens drei) befreundeten Interessierten einfach einmal im Freien nachspielt. Dazu benötigen Sie Papier, Bleistift, Zirkel und Lineal, ein Luftbild des eigenen Standorts (z. B. von Googlemaps), eine Stoppuhr und natürlich: ein Smartphone bzw. einen GPS-Empfänger.

Die Grundidee ist, dass man die Position eines Empfängers relativ zu einer bestimmten Anzahl von Satelliten bestimmt. Wenn nun die Position der Satelliten bekannt ist (und das ist sie!), kann man daraus die Position des Empfängers ableiten.

In der realen technischen Umsetzung, wie bei GPS, ist dieses Prinzip, wie wir noch sehen werden, ziemlich komplex, als Spiel jedoch recht einfach: Sie selbst und Ihre Mitspieler bilden ein Satellitennavigationssystem auf dem Boden nach. Dazu müssen drei Spieler Satelliten (beziehungsweise deren Signale) darstellen und einer den Empfänger. Legen Sie zu Beginn des Spiels zuerst einmal eine „Satellitenkonstellation“ fest. Dazu sucht man sich Geländepunkte auf dem Luftbild aus, welche man in der Realität gut wiederfinden kann, beispielsweise Bäume oder Ecken von

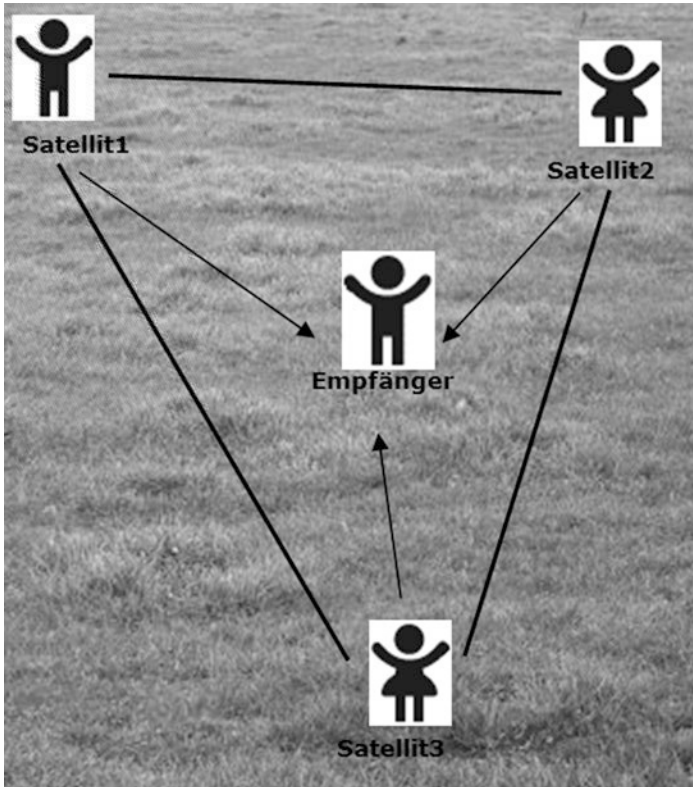


Abb. 1.1 Bilden einer „Satellitenkonstellation“. (Quelle: Autor)

Gebäuden. Es werden drei Satelliten benötigt, daher auch drei markante Punkte – vergleiche Abb. 1.1.

Im Spiel sind die Satelliten zugleich auch deren eigene Funk-signale. Der Einfachheit halber legen wir fest, dass Sie, lieber Leser, in diesem Spiel den Empfänger spielen, Ihre Mitspieler die Satelliten(-signale). Nacheinander müssen nun die Signale einzelnen (Sie bekämen sonst arge Probleme mit der Signalverarbeitung) zum Empfänger, also zu Ihnen hin gehen. Dies tun sie möglichst gleichförmig, also geradlinig und mit konstanter Geschwindigkeit und, um leichter rechnen zu können, mit ungefähr vier km/h. Die

Geschwindigkeit muss mit dem Smartphone bzw. dem GPS-Gerät kontrolliert werden.

Als Empfänger wird Ihnen die Aufgabe zuteil, mit der Stoppuhr zu stoppen, wie lange die einzelnen Signale unterwegs waren und sich diese Laufzeiten zu notieren. Wenn alle Satellitensignale „durchgelaufen“ und ihre Laufzeiten gemessen worden sind, beginnt die Auswertung:

Tragen Sie die ursprünglichen Positionen der Satelliten auf Ihrem Luftbild ein. Mit Hilfe der Signallaufzeiten können Sie nun berechnen, wie weit Sie als Empfänger von den einzelnen Satelliten entfernt waren. Da man bei vier km/h etwa einen Meter in der Sekunde zurücklegt, können die gemessenen Sekundenwerte direkt als ungefähre Entfernungen in Metern verwendet werden. Um diese Information im Luftbild umzusetzen, müssen Sie noch den Maßstab der Aufnahme beachten – bei Bildern von Google Maps kann man sich den entsprechenden Maßstab einblenden lassen (Abb. 1.2).

Nehmen wir an, dass der Empfänger vom ersten Satellit 20 Sekunden entfernt war. Dann ist klar, dass alleine diese Information nicht zur exakten Positionsbestimmung ausreicht – man

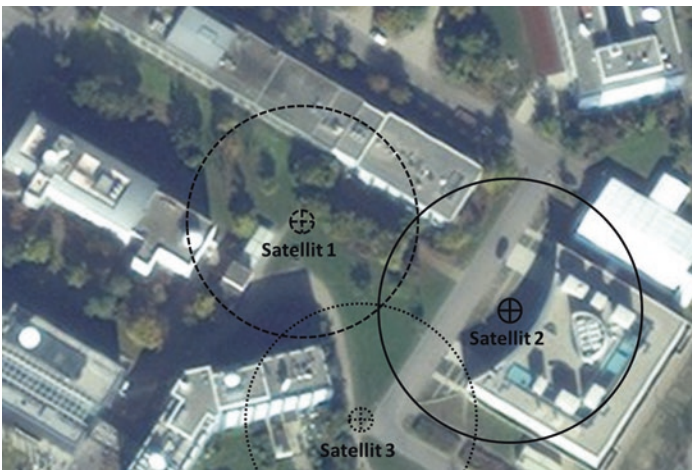


Abb. 1.2 Die Satellitennavigation als Spiel. (Quelle: Autor)

wüsste lediglich, dass man sich irgendwo auf einem Kreis mit dem ersten Satelliten als Mittelpunkt befindet, welcher als Radius 20 Meter hat. Mit Hilfe des zweiten Satelliten lässt sich diese Unsicherheit bereits drastisch reduzieren: Dessen Positionskreis mit sagen wir 30 Meter Radius wird den ersten Kreis im Allgemeinen in zwei Punkten P1 und P2 schneiden. Wenn man nun weitere Kenntnisse über die eigene Position hat, zum Beispiel über den Untergrund (Wiese oder Straße), könnten diese Informationen bereits zur exakten Positionsbestimmung ausreichen, da man einen der zwei Punkte verwerfen könnte. In der Abbildung befindet sich ein Schnittpunkt zweier Positionskreise auf dem Dach eines Gebäudes. Diesen wird man wohl verwerfen müssen ...

Vergleichbar wäre diese Situation mit der eines sich auf dem Meer befindenden Schiffes: Wenn nun beispielsweise P1 an Land und P2 auf dem Meer wäre, könnte man bereits durch die Messung zu zwei Bezugspunkten eindeutig eine Ortung durchführen.

Wenn man diese Kenntnis jedoch nicht hat, wenn etwa beide gemessenen Punkte im Meer liegen, ist zur eindeutigen Positionsbestimmung die Auswertung eines dritten Satellitensignals erforderlich: Der so entstehende Kreis wird die Positionskreise von Satellit 1 und Satellit 2 in genau einem Punkt schneiden – vorausgesetzt die Messung war entsprechend genau- und damit das Navigationsproblem lösen. Im Spiel können Sie dieses Prinzip mit Zirkel und Lineal konkret nachempfinden.

Da Satellitennavigationssysteme auch Positionen oberhalb des Erdbodens, wie sie beispielsweise in der Luftfahrt vorkommen, erfassen, also eine dreidimensionale Ortung ermöglichen sollen, ist es bei diesen notwendig, noch einen vierten Satelliten zu empfangen, um eine Eindeutigkeit der Ortung zu erzielen (Abb. 1.3).

Wir halten als Spielergebnis fest:

- Bei der Satellitennavigation misst man die Entfernungen zu Punkten mit bekannten Koordinaten – den Satelliten- und zieht damit Rückschlüsse auf die eigene Position.
- Die Entfernungsmessung wird durch Messung von Signallaufzeiten realisiert.

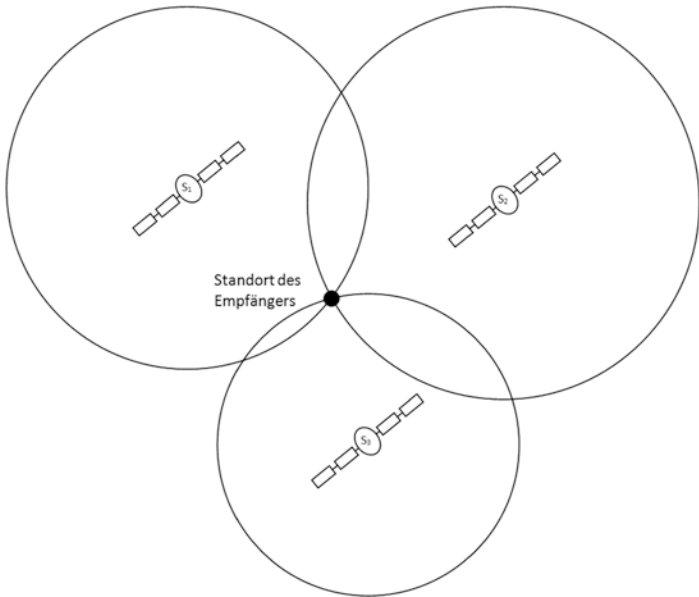


Abb. 1.3 Ortung durch Entfernungsmessung in zwei Dimensionen.
(Quelle: Autor)

- Um eine dreidimensionale Ortung zu ermöglichen, ist für eine eindeutige Positionsbestimmung der Empfang von mindestens vier Satellitensignalen erforderlich.
- Die Genauigkeit der Ortung wird in erster Linie durch die Genauigkeit der Zeitmessung und die exakte Positionsbestimmung der Satelliten beeinflusst.

Um zu verstehen, warum diese auf den ersten Blick so einfache Grundidee in der Umsetzung derart komplex ist, dass es bis zum heutigen Tag immer noch eine nur von wenigen Nationen und nur mit großen Mühen lösbare Herausforderung darstellt, ein Satellitennavigationssystem zu betreiben, muss man sich folgende Fragen stellen:

- Wie kann man Positionen auf der Erde, einem komplex geformten dreidimensionalen Körper, überhaupt metergenau angeben? Diese Grundfrage der Navigation wird im Folgenden kurz behandelt. Hier wird auch eine kurze historische Entwicklung der Navigation skizziert.
- Wie kann man die erforderliche Genauigkeit erreichen und wie kann man die zur Positionsbestimmung notwendigen Daten von einem über 20.000 km entfernten Sender möglichst fehlerfrei und sicher zu einem Empfänger auf der Erde übermitteln? Die Antwort auf diese und andere Frage finden Sie in Kap. 3. Hier wird die technische Realisierung am Beispiel des US-amerikanischen GPS ausführlich beschrieben.
- Die Kap. 4 und 5 befassen sich mit den Satellitennavigationssystemen GLONASS und Galileo.
- Im Kap. 6 möchte ich eine Reihe von Anwendungen – naheliegende und überraschende – vorstellen, welche ohne Satellitennavigation nur sehr schwer oder teilweise gar nicht realisierbar wären, um damit vielleicht am Ende eine Antwort auf die immer wieder zu stellende Frage zu geben „was das Ganze soll“.

1.2 Grundlagen der Navigation – bei der nächsten Welle bitte links abbiegen

Im Wort Navigation (lat: navem agere, ein Schiff führen) steckt bereits der ganze ursprüngliche Sinn und Zweck der Navigation. Das „sich zurecht finden auf dem Wasser“, wie man Navigation auch übersetzen könnte, stellte die Menschheit bereits im Altertum vor die größten wissenschaftlichen Herausforderungen und war daher schon lange ein wichtiges Feld der naturwissenschaftlichen Forschung. Denn im Gegensatz zur „Navigation an Land“ ist es schwer bzw. schlicht nicht möglich, sich auf dem Wasser an Geländepunkten zu orientieren. So ist es wenig verwunderlich, dass sich die frühen Seefahrer noch nicht weit aufs Meer hinaustrauten, sondern ihre Schiffe entlang der Küsten lenkten –

zu groß war die Sorge, sich unwiederbringlich und unrettbar auf dem Meer zu verirren.

Allerdings wusste man schon im Altertum viel über Zusammenhänge am Himmel und kannte den Lauf von Sonne, Mond und Sternen sehr genau. Nun bringt es jedoch die Bewegung der Erde, also die Rotation um ihre eigene Achse und ihre Bewegung um die Sonne, mit sich, dass die Position der Himmelskörper sich mit der Zeit verändert. Und so war das Problem der Navigation schon immer auch ein Problem der Zeitmessung. Überhaupt wurde bereits früh versucht, die Navigation mit Hilfe technischer Hilfsmittel zu verbessern und zu vereinfachen. Auf einige dieser Hilfsmittel wird auch im Folgenden kurz eingegangen.

1.2.1 Navigationswerkzeuge

Die Angabe der eigenen Position (Ortung) kann prinzipiell nur in Bezug auf bekannte, irgendwie vermessbare Punkte erfolgen. Geometrisch muss man zwischen zwei grundverschiedenen Verfahren unterscheiden: Winkelpeilung und Entfernungsmessung.

Vielleicht erinnern Sie sich noch an Ihren Geometrieunterricht und die unterschiedlichen Verfahren der Dreieckskonstruktion mit Zirkel und Lineal. Wenn drei mit Bedacht gewählte Größen eines Dreiecks gegeben waren, so konnte man dieses in gewissem Sinne eindeutig konstruieren. Für die Navigation von Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die folgenden Fälle:

1. Gegeben sind die Grundlinie (Basis) des Dreiecks sowie zwei angrenzende Winkel (Abb. 1.4).



Abb. 1.4 Dreieckskonstruktion mit Winkeln. (Quelle: Autor)

2. Neben der Basis kennt man an Stelle der Winkel noch die beiden Schrägentfernungen des dritten Eckpunktes zu Anfangs- und Endpunkt der Basis (Abb. 1.5).

In beiden Fällen lässt sich das Dreieck bis auf Symmetrie, also die Frage „Befindet sich der dritte Eckpunkt oberhalb oder unterhalb der Basis?“, eindeutig bestimmen.

Dieses seit dem Altertum bekannte mathematische Wissen wird bereits seit Jahrhunderten zur nautischen Navigation genutzt. Da sich das Wort „Navigation“ ursprünglich allein auf die Schifffahrt bezog, wäre der Zusatz „nautisch“ eigentlich überflüssig. Mittlerweile nutzen wir das Wort jedoch in nahezu allen Bereichen des „Sich zurecht Findens“, also auf See, an Land und in der Luft.

Als Basis-bildende Bezugspunkte wurden entweder markante Geländepunkte wie Berge oder später auch Leuchtfeuer verwendet. Durch Peilung wurden die Winkel bestimmt und so konnte anschließend die Position grob ermittelt werden.

Ein deutlich universelleres Verfahren stellte die Verwendung der Himmelskörper zur Navigation dar und löste auch das Problem, dass es auf dem Meer, also weit entfernt von jeder Küste, nun



Abb. 1.5 Dreieckskonstruktion mit Entfernungen. (Quelle: Autor)