



**TECHNIK IM FOKUS**

DATEN FAKTEN HINTERGRÜNDE

Tobias Schüttler

# Satellitenavigation

Wie sie funktioniert und wie sie  
unseren Alltag beeinflusst



**Springer** Vieweg

# Technik im Fokus

Konzeption der Energie-Bände in der Reihe Technik im Fokus: Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak, Institut für Regenerative Energiesysteme, Fachhochschule Nordhausen

## **Technik im Fokus**

Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird

Wesselak, Viktor; Voswinckel, Sebastian, ISBN 978-3-642-24296-0

Komplexität – Warum die Bahn nie pünktlich ist

Dittes, Frank-Michael, ISBN 978-3-642-23976-2

Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?

Neles, Julia Mareike; Pistner, Christoph (Hrsg.),  
ISBN 978-3-642-24328-8

Energie – Die Zukunft wird erneuerbar

Schabbach, Thomas; Wesselak, Viktor, ISBN 978-3-642-24346-2

Werkstoffe – Unsichtbar, aber unverzichtbar

Weitze, Marc-Denis; Berger, Christina, ISBN 978-3-642-29540-9

Werkstoff Glas – Alter Werkstoff mit großer Zukunft

Schaeffer, Helmut; Langfeld, Roland, ISBN 978-3-642-37230-8

3D-Drucken – Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert

Fastermann, Petra, ISBN 978-3-642-40963-9

Wasserstoff und Brennstoffzellen – Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff

Lehmann, Jochen; Luschtinetz, Thomas, ISBN 978-3-642-34667-5

Weitere Bände zur Reihe finden Sie unter

<http://www.springer.com/series/8887>

Tobias Schüttler

# Satellitennavigation

Wie sie funktioniert und wie sie  
unseren Alltag beeinflusst



Springer Vieweg

Tobias Schüttler  
Benediktbeuern, Deutschland

ISSN 2194-0770

ISBN 978-3-642-53886-5

ISBN 978-3-642-53887-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-53887-2

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

*Umschlaggestaltung:* ESA–P. Carril

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

---

## Vorwort

Meinen ersten Kontakt mit dem Thema Satellitennavigation hatte ich 2003 im Rahmen meiner damaligen studentischen Tätigkeit im DLR\_School\_Lab Oberpfaffenhofen bei der Betreuung des gleichnamigen Experimentes. Für viele gute und geduldige Erklärungen danke ich in diesem Zusammenhang Dr. Johann Furthner. Dr. Dieter Hausmann danke ich ganz besonders dafür, mich zum Schreiben dieses Buches motiviert zu haben. Den Lektorinnen des Springer Verlages sei Dank für ihre Geduld – das gesteckte Ziel, das Manuskript des Buches abzugeben, bevor Galileo den operationellen Dienst aufnimmt, habe ich gnadenlos ausgereizt. Zu guter Letzt danke ich meiner Frau für ihre Geduld mit mir.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundprinzipien der Satellitennavigation</b>	1
1.1	Ein Mitmachexperiment zum Einstieg	2
1.2	Grundlagen der Navigation – bei der nächsten Welle bitte links abbiegen	7
1.2.1	Navigationswerkzeuge	8
1.2.2	Koordinaten auf der Erde	19
1.2.3	Karten und das WGS 84	23
<b>2</b>	<b>Das erste Satellitenortungssystem: Transit</b>	29
2.1	Systemarchitektur	32
2.1.1	Bodensegment	32
2.1.2	Raumsegment	33
2.1.3	Nutzersegment	35
2.2	Funktionsprinzip des Transit Systems	35
<b>3</b>	<b>NAVSTAR GPS</b>	43
3.1	Systemarchitektur	43
3.1.1	Bodensegment	44
3.1.2	Raumsegment	45
3.1.3	Nutzersegment	52
3.2	Funktionsprinzip	52
3.2.1	Laufzeitmessung	56
3.2.2	Atomuhren	58
3.2.3	Informationsübertragung mit elektro- magnetischen Wellen	62

3.2.4	Satellitensignale und Navigationsmitteilung . . .	69
3.2.5	Pseudozufalls Codes und Autokorrelation . . .	72
3.2.6	Die GPS-Codes . . . . .	75
3.2.7	Auswertung der Satellitensignale . . . . .	76
3.3	Genauigkeit und Fehlerursachen . . . . .	80
3.3.1	Systemimmanente Fehler . . . . .	81
3.3.2	Atmosphärenbedingte Fehler . . . . .	82
3.3.3	Einfluss der Satellitengeometrie . . . . .	84
3.3.4	Fehler durch Mehrwegeeffekte . . . . .	86
3.3.5	Zusammenfassung der Fehlergrößen und Systemintegrität . . . . .	87
3.4	Ergänzungen zu GPS . . . . .	89
3.4.1	Differentielles GPS (DGPS) . . . . .	90
3.4.2	WAAS und EGNOS . . . . .	94
<b>4</b>	<b>GLONASS</b> . . . . .	<b>99</b>
4.1	Systemarchitektur . . . . .	99
4.1.1	Bodensegment . . . . .	100
4.1.2	Raumsegment . . . . .	102
4.1.3	Nutzersegment . . . . .	105
4.2	Funktionsprinzip . . . . .	106
<b>5</b>	<b>Galileo</b> . . . . .	<b>111</b>
5.1	Systemarchitektur . . . . .	114
5.1.1	Bodensegment . . . . .	115
5.1.2	Raumsegment . . . . .	117
5.1.3	Nutzersegment . . . . .	122
5.2	Funktionsprinzip . . . . .	125
<b>6</b>	<b>Anwendungen der Satellitennavigation</b> . . . . .	<b>129</b>
6.1	Militärische Anwendungen . . . . .	129
6.2	Zivile Anwendungen . . . . .	134
6.2.1	GNSS im Straßenverkehr . . . . .	134
6.2.2	GNSS auf der Schiene . . . . .	137
6.2.3	GNSS in der Seefahrt . . . . .	139
6.2.4	GNSS in der zivilen Luftfahrt . . . . .	139



---

6.2.5 Outdoor und Freizeit . . . . .	142
6.2.6 Wissenschaftliche Anwendungen . . . . .	145
6.2.7 Weitere Anwendungen . . . . .	146
<b>Literatur</b> . . . . .	149
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	151

Der Begriff 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 wird er jedoch meist für beides, also die Satellitenortung und die Satellitennavigation verwendet, 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 allgemei-

**Tab. 1.1** Das dürfen Sie erwarten – Das dürfen Sie nicht erwarten

<ul style="list-style-type: none"><li>– Verständliche, weitgehend formelfreie Darstellung der prinzipiellen Funktionsweise der Satellitenortung</li><li>– Beschreibung einer ganzen Reihe von Anwendungen aus unterschiedlichen Gebieten</li><li>– Beschreibung der Einflüsse der Einstein'schen Relativitätstheorie auf die Satellitennavigation</li><li>– Einblicke in eine faszinierende Technologie, welche ohne die Erkenntnisse der modernen Naturwissenschaften undenkbar wäre</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Herleitungen der Formeln, welche bei der Satellitennavigation eine Rolle spielen</li><li>– Exakte Beschreibung und Erklärung der Empfänger- und Antennentechnik</li><li>– Eine Herleitung der Relativitätstheorie</li><li>– Mathematische Berechnungen jenseits der Grundrechenarten</li><li>– Politische Hintergründe zu Galileo</li><li>– Eine Anleitung zum Geocaching</li><li>– Nach dem Lesen dieses Buches als echter Technik-Nerd akzeptiert zu werden – aber vielleicht legt es hierzu den Grundstein . . .</li></ul>
---	---

ner 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 Reduktion, also dem Verständlich machen 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).

---

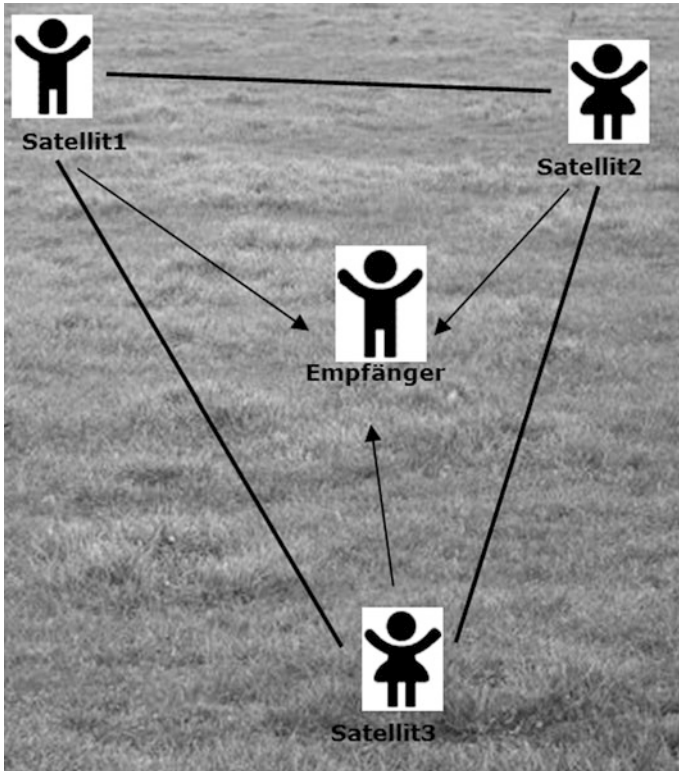
## 1.1 Ein Mitmachexperiment zum Einstieg

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 eine Stoppuhr, Papier, Bleistift, Zirkel und Lineal, ein Luftbild des eigenen Standorts (z. B. von Google-maps), eine Stoppuhr und natürlich: ein Smartphone mit GPS oder, noch besser, ein GPS-Handheld.

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

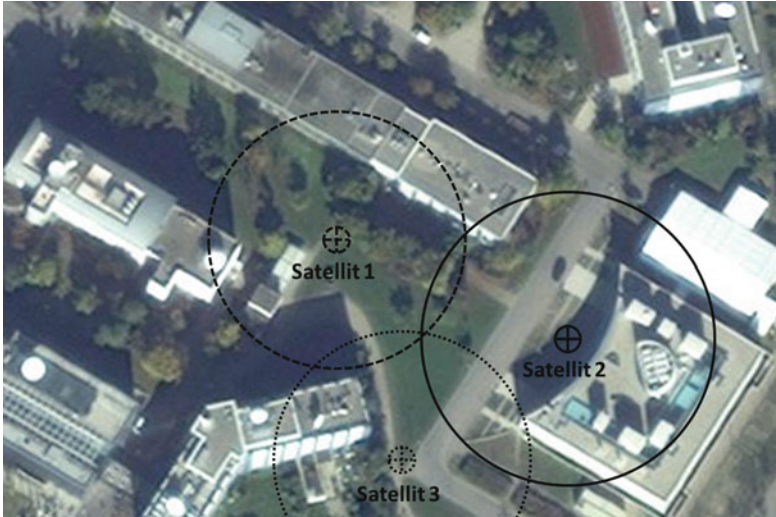
Im Spiel sind die Satelliten zugleich auch deren eigene Funksignale. Der Einfachheit halber legen wir fest, dass Sie, lieber Leser, in die-



**Abb. 1.1** Bilden einer „Satellitenkonstellation“, Quelle: Autor

sem 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 diese 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-Handheld kontrolliert werden.

Als Empfänger wird Ihnen die Aufgabe zuteil, mit der Stoppuhr zu stoppen, wie lange die einzelnen Signale unterwegs waren und sich diese



**Abb. 1.2** Die Satellitennavigation als Spiel, Quelle: Autor

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 Googlemaps 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 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 . . .

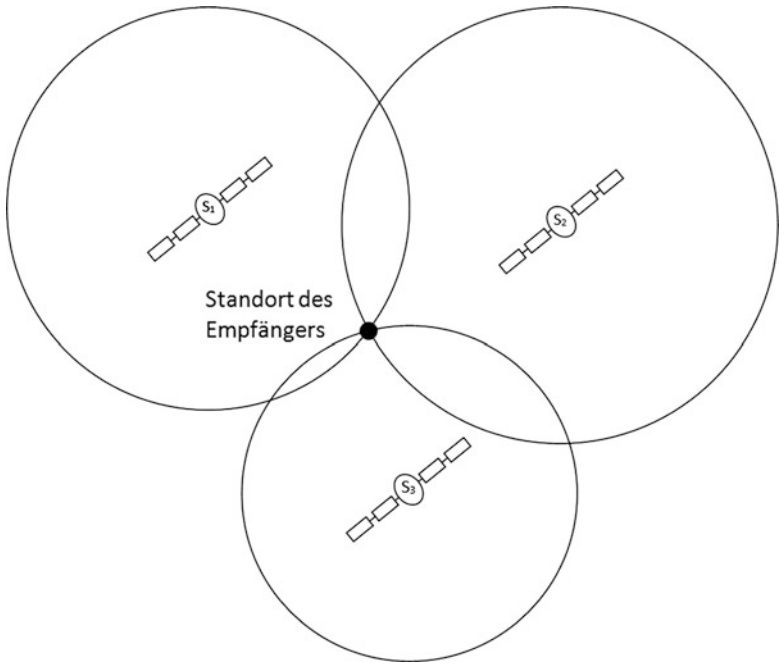
Vergleichbar wäre diese Situation mit der eines sich auf dem Meer befindenden Schiffes: Wenn nun beispielsweise P1 an Land und P2 auf dem Meer wäre, könnte man bereits durch die Messung zu zwei Bezugspunkten eindeutig eine Ortung durchführen.

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.
- 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.



**Abb. 1.3** Ortung durch Entfernungsmessung in zwei Dimensionen, Quelle: Autor

Um zu verstehen, warum diese auf den ersten Blick so einfache Grundidee in der Umsetzung derart komplex ist, dass es bis zum heutigen Tag weltweit nur ein einziges globales in allen Details voll funktionsfähiges Satellitennavigationssystem, nämlich das US-amerikanische NAVSTAR GPS gibt, 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 des derzeit wichtigsten Satellitennavigationssystems, des US-amerikanischen GPS, ausführlich beschrieben.

- Welche anderen bedeutenden Satellitennavigationssysteme gibt es und wie kommt es, dass diese dem US-Amerikanischen GPS bisher noch nicht das Wasser reichen können? Das russische GLONASS und das europäische Galileo System werden in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellt.

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 „was das ganze soll“ zu geben.

---

## **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