

GPS (Global Positioning System) und Radionavigation

Referat anlässlich des Fluglehrer-Refreshers vom 12. November 1999 in Schwarzenburg
Autor: Karl Hunkeler, dipl. El.-Ing. ETH, FI, IRI, ATPL 13722

1. Teil: Grundlagen

1. Wie entstand GPS?

- 1.1 Militärische Bedürfnisse in den USA
- 1.2 Militärische Bedürfnisse in der UdSSR
- 1.3 Zivile Bedürfnisse

2. Technische Grundlagen

3. Was kann GPS heute?

- 3.1 Allgemein
- 3.2 Genauigkeit und Funktionssicherheit
- 3.3 Integrität
- 3.4 RAIM
- 3.5 Verknüpfung mit Karten

4. Stärken des GPS

- 4.1 Gute Zugänglichkeit
- 4.2 Hohe Genauigkeit
- 4.3 Viele Zusatzfunktionen

5. Schwächen des GPS

- 5.1 Frequenz nicht geschützt
- 5.2 US-Militär ist zuständig
- 5.3 Leichte Störbarkeit
- 5.4 Fehlende Integrität

6. Zukünftige Entwicklung

2. Teil: Anwendung des GPS in der Aviatik

1. Grundlagen

2. Elemente

3. Bedienung

- 3.1 Inbetriebnahme
- 3.2 Selbsttest
- 3.3 Datenbank
- 3.4 Einstellungen
- 3.5 Programmierung vor dem Flug, Flugvorbereitung
- 3.6 Anwendung im Flug

4. Einschränkungen / Bemerkungen

5. Ausblick

1. Teil: Grundlagen

1. Wie entstand GPS?

1.1 Militärische Bedürfnisse in den USA

Das Global Positioning System wurde vom amerikanischen Verteidigungsministerium (DOD = Department of Defense) entwickelt, um militärischen Anwendern jederzeit und überall auf und über der Erde eine exakte Positionsbestimmung zu ermöglichen.

Eine Anforderung der Armee war, dass z.B. ein abgesprungener Pilot aufgrund der GPS-Position von einem Suchhelikopter auch in unübersichtlichem Gelände sofort gefunden werden kann. Ferner müssen Rendez-Vous-Manöver zwischen einem Tankflugzeug und einem Jäger exakt geplant und durchgeführt werden können, so dass beide Flugzeuge aus unterschiedlichen Ausgangspositionen zur selben Zeit am selben Ort mit derselben Höhe und Geschwindigkeit und Flugrichtung eintreffen.

Das System ist in einer ersten Version komplett und im operationellen Betrieb. Es kann nicht nur von der amerikanischen Armee, sondern auch allgemein benutzt werden aufgrund einer Vereinbarung zwischen dem DOD und dem DOT (Department of Transport). Bis mindestens im Jahr 2005 ist diese Benützung zugesichert und gebührenfrei, mindestens im Mode SA (selective availability).

1.2 Militärische Bedürfnisse in der UdSSR

Ein gleichwertiges System mit der Bezeichnung GLONASS wurde von der ehemaligen UdSSR entwickelt und in Betrieb genommen. Es arbeitet im gleichen Frequenzband wie das GPS nach einem ähnlichen Prinzip und ist ebenfalls für allgemeine Benutzung vorgesehen.

1.3 Zivile Bedürfnisse

1.3.1 Aviatik

Neben der konventionellen Koppelnavigation (terrestrisch oder mit Sternen) wurde seit dem zweiten Weltkrieg die elektronische Navigation mit NDB, VOR, DME, LORAN, OMEGA, ILS, MLS usw. immer weiter entwickelt. Alle diese Systeme sind entweder relativ ungenau oder nur in einem kleinen Bereich einsetzbar. Zudem sind durch die verwendeten Frequenzen Einschränkungen in der Anzahl der Stationen vorgegeben. Das Aufkommen von GPS als Ersatz von natürlichen Sternen durch künstliche Himmelskörper ermöglichte weiten Kreisen die Erfüllung von Bedürfnissen, die sogar zum Teil zuerst noch gefunden werden mussten.

Das Vorhandensein des GPS weckte sofort auch in der Aviatik das Bedürfnis, alle bisherigen Systeme wenn möglich durch ein einziges universelles System abzulösen oder wenigstens zu ergänzen.

1.3.1.1 Motorflug

Der grosse Vorteil des GPS für den Motorflug liegt in der Orts-Ungebundenheit und der theoretisch überall auf der Welt gleichen Genauigkeit. Es gibt keine Gebiete mehr, die nicht erschlossen sind, da die Satelliten auch die Polargegenden abdecken. Zudem scheint GPS praktisch wetterunabhängig zu funktionieren, ganz im Gegensatz zur Astronavigation.

Zudem kann mit GPS jederzeit die kürzeste Distanz und die Grosskreisrichtung zu jedem anderem Punkt auf der Erde bestimmt werden, was ja die Grundlage jeder Navigation ist.

1.3.1.2 Segelflug

Beim Segelflug ist der Hauptvorteil, dass ein einziges relativ leichtes Gerät eine ganze Anzahl anderer Geräte ersetzen kann. Je nach Bedürfnis können ein Barograph, ein separater End-Anflugrechner, die doppelte Fotoeinrichtung und andere Geräte ersetzt werden. Da die modernen Geräte den gesamten Flugweg aufzeichnen können (inklusive Höhenprofil), wird die Auswertung von Wettbewerbsflügen stark vereinfacht und vereinheitlicht.

1.3.2 Landvermessung

Dank Einsatz von GPS in der Landvermessung liegen alle Messdaten in einer komputerlesbaren Form vor. Dadurch können diese Daten problemlos in anderen Bereichen weiterverwendet werden, z.B. zur Erstellung genauer Landkarten oder von Stadtplänen.

Mit den hochpräzisen GPS-Geräten in Kombination mit Laser-Distanz- und Winkelmessgeräten muss eine viel kleinere Anzahl genauer Referenzpunkte vermessen werden. Dadurch können die Vermessungsarbeiten viel schneller durchgeführt werden.

Die für die Landvermessung notwendige hohe Genauigkeit der Positionsbestimmung wird vor allem dadurch erreicht, dass dieselbe Position immer wieder vermessen wird und die Messresultate ausgemittelt werden. Eine andere weit verbreitete Methode in der Landvermessung ist die, dass an einem ganz genau bekannten Punkt eine GPS-Referenzstation aufgebaut wird, welche ein Korrektursignal abstrahlt (Differential GPS). Dank dieser Methode können Grundstücke - wiederum in Kombination mit Laser-Distanz- und Winkelmessgeräten - viel genauer vermessen und die Vermessungsergebnisse auf längere Zeit korrekt gespeichert werden. Es nützt dann nichts mehr, die Marksteine zu verschieben, oder die Pläne zu ändern, um ein grösseres Grundstück zu erhalten, da die Marksteine oder die Pläne nur noch der Visualisierung der Grenzen dienen und keine rechtliche Verbindlichkeit mehr haben.

1.3.3 Seefahrt

In der zivilen Seefahrt ist die Positionsbestimmung mit Sextant bereits vollständig abgelöst durch die Navigation mit GPS, genau so wie die Kurzwellenfunkverbindungen durch Satelliten-Kommunikation ersetzt wurden. Viele Satelliten-Kommunikationsverbindungen benutzen zudem die automatische Positioneingabe vom GPS-Gerät zur Standort-Übermittlung, nicht nur im Notfall, sondern auch bei normalen Übermittlungen.

1.3.4 Automobile

Wie überall ist es auch auf der Strasse wichtig, jederzeit die eigene Position zu kennen, um an einen bestimmten Ort zu gelangen. Ferner müssen die möglichen Wege bekannt sein.

Auch bei Automobilen wurden die Vorteile des GPS rasch erkannt. Daraus entstand das Bedürfnis nach universellen Navigationssystemen, die einen jederzeit ans Ziel leiten können, auch wenn man eine Abzweigung verpasst hat. Moderne Systeme können zudem Stauinformationen verarbeiten, um optimale Reiserouten zu berechnen. Zu diesem Zweck werden auch elektronische Karten verwendet.

Das GPS bildet also nur einen Teil des Systems, nämlich den Teil, der ermöglichen soll, die genaue Position zu kennen. Diese Aufgabe kann aber das GPS insbesondere in Tunneln, aber auch in Städten, in dicht bebauten Gebieten, in engen Tälern, in Wäldern usw. nicht immer erfüllen. Deshalb wird GPS für den Einsatz in Autos kombiniert mit anderen Sensoren, z.B. richtungsempfindlichen Kreisel (Kompass) sind in Städten praktisch unbrauchbar), Radumdrehungszählern zum Feststellen der zurückgelegten Distanz usw. Diese zusätzlichen Sensoren werden jeweils wieder mit der vom GPS-Empfänger ermittelten Position verglichen und gegebenenfalls korrigiert. Die Kriterien dafür werden vom Bordrechner ermittelt.

1.3.5 Landwirtschaft

Dank genauer Positionsbestimmung ist es den amerikanischen Farmern auf ihren riesigen Grundstücken möglich, festzuhalten, auf welchen Teilen der Felder vermehrt Schädlinge auftreten, oder wo die Erträge ungenügend sind. Dank Speicherung dieser Daten in einem Computer und anschliessender Steuerung der Traktoren mit Hilfe von GPS können Dünger oder Schädlingsbekämpfungsmittel gezielt ausgetragen werden. Im folgenden Jahr werden die Auswirkungen der getroffenen Massnahmen wiederum mit Hilfe von GPS kontrolliert und protokolliert.

1.3.6 Weitere Anwendungen

Es werden dauernd weitere Anwendungen von GPS bekannt. Es soll sogar schon Leute geben, die beim Spazieren oder beim Velofahren GPS dabei haben, um die Geschwindigkeit oder den zurückgelegten Weg zu protokollieren. Schatzsucher notieren die Koordinaten, wo sie den Schatz vermuten, usw.....

2. Technische Grundlagen

Im Nachfolgenden werden nur die Eigenschaften des GPS und der möglichen Nachfolgesysteme beschrieben, nicht aber das GLONASS.

2.1 Satellitenbahnen

Das GPS besteht im Wesentlichen aus einem aktiven Teil, den Satelliten, welche in ca. 20'000 km Höhe die Erde umkreisen, und einem passiven Teil, den GPS-Empfängern. Die Satelliten werden von Bodenstationen aus laufend überwacht und gewartet (softwaremässig).

Die zurzeit 24 operationellen Satelliten sind in total 6 Umlaufbahnen angeordnet, wobei jeweils vier Satelliten pro Umlaufbahn vorgesehen sind. Die Umlaufzeit beträgt ca. 12 Stunden (genau einen halben Sternentag, d.h. 11 h 58'). Weitere Satelliten sind in Parkumlafbahnen und können bei Bedarf aktiviert werden. Zudem sind immer ein paar Satelliten am Boden bereit, um jederzeit in eine Umlaufbahn eingeschossen zu werden. Die Umlaufbahnen können bei Bedarf angepasst werden.

2.2 Zeitmessung

Die Uhren der Satelliten müssen extrem genau laufen, damit die Bodengeräte ihre Position genau bestimmen können. Die Genauigkeit der Uhren beträgt ca. 10-12 bei den Satelliten und sogar 10-15 bei den Bodenstationen. In einer Nano-Sekunde, d.h. einem Tausendstel von einer Millionstel-Sekunde, legt das Licht (und damit auch die Funksignale) eine Distanz von 30 cm zurück. Um also eine Position am Boden oder in der Luft genau berechnen zu können, muss also einerseits die Position der Satelliten mit mindestens der gleichen Genauigkeit bekannt sein, und zudem muss der Zeitpunkt der Zeitmessung entsprechend genau bekannt sein.

2.3 Minimale Anzahl Satelliten

Die Positionsbestimmung mit GPS beruht also auf einer Auswertung von Signal-Laufzeiten und sehr genauer Zeitmessung. Zur Positionsbestimmung auf der Erdoberfläche sind mindestens drei Satelliten notwendig, für eine Positionsbestimmung inklusive Höhe sind mindestens vier Satelliten notwendig.

2.4 Sichtbare Satelliten

Von den total 24 Satelliten sind zu jedem beliebigen Zeitpunkt auf der Erdoberfläche maximal 12 Satelliten gleichzeitig sichtbar unter der Annahme, dass die Satelliten wirklich gleichmässig auf ihren Umlaufbahnen verteilt sind. In der Praxis sind aber die Signale derjenigen Satelliten, welche nur knapp über dem Horizont sind, nicht auswertbar. In offenem Gelände sollten jedoch meistens sechs bis acht Satelliten mit genügender Signalfeldstärke empfangbar sein. Als Richtwert gilt, dass ein Satellit für ein brauchbares Signal ca. 10° bis 15° über dem optischen Horizont stehen sollte. Zudem sollte die Sichtlinie zum Satelliten nicht durch irgendwelche Hindernisse (Bäume, Brücken, Lackierung der Antenne) beeinträchtigt sein.

Wegen der hohen Frequenzen, welche zur Übertragung der GPS-Signale verwendet werden (höher als 1000 MHz) können nur Signale von Satelliten empfangen werden, welche auch optisch sichtbar sind.

2.5 Verfügbare Satelliten

Die Satellitenbahnen können von den Bodenstationen aus verändert werden. Da das amerikanische Militär Eigentümer der Satelliten ist, werden die Bahnen in erster Linie für deren Bedürfnisse optimiert. So ist bekannt, dass während des ersten Golfkrieges 1991, als erst 21 Satelliten zur Verfügung standen, deren Bahnen so angeordnet wurden, dass in der Golfregion jeweils eine optimale Überdeckung zustande kam. Es ist deshalb durchaus möglich und kommt auch heute noch immer wieder vor, dass an gewissen Orten und zu bestimmten Zeiten nicht mehr als vier Satelliten empfangen werden können. Dafür stehen jedoch an den Krisenorten mehr Satelliten zur Verfügung. Wo zu welchem Zeitpunkt wieviele Satelliten verfügbar sind, wird an verschiedenen Orten publiziert, unter anderem auch im Internet. Ferner werden die Bahndaten aller Satelliten periodisch von jedem einzelnen Satelliten in Form eines speziellen Telegramms ausgestrahlt, damit die Empfänger „wissen“, mit welchen Satelliten sie rechnen können. Das Bordgerät berechnet aus den Bahndaten und der eigenen bekannten oder vermuteten Position die Satelliten, welche verfügbar sein müssten.

2.6 Feldstärke

Die von den Satelliten abgestrahlten Signale kommen auf der Erdoberfläche sehr schwach an, etwa 30 dB unter dem Rauschen! Durch spezielle Modulationstechniken und mittels Korrelationsfilter können die Signale trotzdem sicher erkannt und ausgewertet werden.

Die meisten Hersteller von GPS-Empfängern für Flugzeuge liefern auch gleich passende Antennen mit, damit eine optimale Anpassung an die schwachen Signale möglich ist. Dabei schreiben die meisten Lieferanten vor, dass die Kabel nicht verlängert werden dürfen, und dass die Antennen nicht übermalt werden dürfen, weil sonst der Empfang nicht mehr gewährleistet wäre!

Siehe auch Kapitel 5.3, leichte Störbarkeit.

2.7 Einflüsse der Atmosphäre

Die Signale des GPS-Systems werden zurzeit auf zwei Frequenzen abgestrahlt, wobei nur die eine davon für zivile Zwecke uneingeschränkt freigegeben ist (ca. 1500 MHz). Die zweite Frequenz (ca. 1200 MHz) darf von zivilen Geräten für die Korrektur von Einflüssen der Atmosphäre mitbenutzt werden, jedoch kann die auf dieser Frequenz übermittelte Information ohne spezielle Chiffrier-Module nicht ausgewertet werden.

Die Ausbreitung der Radiosignale in der Atmosphäre folgt den gleichen physikalischen Gesetzen wie die Ausbreitung von Licht. Wir alle wissen, dass die Sonne nahe am Horizont rötlich erscheint. Dies hat mit der wellenlängenabhängigen Brechung des Lichtes zu tun, welche macht, dass das bläuliche Licht weniger stark gebrochen wird und damit die blaue Farbe des Himmels verursacht, und die rote Farbe mehr zur Erdoberfläche hin gebrochen wird.

Auf die gleiche Art werden die beiden Frequenzen, welche beim GPS verwendet werden, unterschiedlich stark gebrochen. Daraus resultiert eine unterschiedliche Signallaufzeit, welche von gewissen Empfängern ausgewertet werden kann, um die Einflüsse der Atmosphäre in der Berechnung zu berücksichtigen und damit genauere Positionsbestimmungen zu ermöglichen.

2.8 Ephemeriden

Die Bahndaten der Satelliten werden Ephemeriden genannt. Jeder Satellit wird regelmässig vom Boden aus genau vermessen (mindestens zweimal pro Tag). Daraus berechnet die Bodenstation die sogenannte Bahngleichung. Diese Bahngleichung beinhaltet die genaue Position des Satelliten zu einem genau definierten Zeitpunkt, sowie die Geschwindigkeit und den Vektor in diesem Zeitpunkt, sowie weitere Terme, welche die Änderung der Bahn in Abhängigkeit der Zeit als Einflüsse von Reibung der Atmosphäre und weiteren Einflüssen beschreiben.

Der Referenzzeitpunkt seinerseits bezieht sich auf UTC und eine Systemzeit, zu der das GPS in Betrieb genommen wurde, ferner werden die seit der Inbetriebnahme des Systems eingeschobenen Schaltsekunden übertragen.

2.9 Gravitationsfeld der Erde

Dank GPS weiss man heute, dass die „Meereshöhe“ nicht gleichbedeutend ist mit einem konstanten Abstand vom Erdmittelpunkt, selbst nicht unter Berücksichtigung der Abplattung der Erde wegen der Erdrotation. Vielmehr bewirken unterschiedlich dichte Massen im Erdmantel, dass die Meeresoberfläche um bis zu 60 Meter von der mathematisch berechneten Meereshöhe abweichen kann. Diese lokalen Störungen im Gravitationsfeld der Erde beeinflussen auch die Bahnen der Satelliten, und zwar unterschiedlich, je nachdem woher die Satelliten in diese Störzonen einfliegen. Die Einflüsse sind zwar dank der hohen Geschwindigkeit der Satelliten (ca. 11,2 km/sec.) und der damit verbundenen Massenträgheit klein, aber für genaue Messungen nicht vernachlässigbar.

Man bedenke, dass wir unsere genaue Position dadurch ermitteln wollen, dass wir die Abstände zu Himmelskörpern vermessen, deren ganz genaue Position gar nicht bekannt ist!

2.10 Koordinatennetze

Die genaue Kenntnis einer Position allein genügt noch nicht. Man muss sie auch noch mit anderen Positionen vergleichen können, d.h. man benötigt ein universelles Koordinatensystem.

Die meisten grösseren Länder verwenden für ihre Bedürfnisse jeweils ein eigenes Koordinatensystem. Dieses ist in der Regel so ausgelegt, dass innerhalb des betreffenden Landes in den Kartendarstellungen möglichst wenig Verzerrungen entstehen.

Um aber weltweit operieren zu können, benötigt man ein Koordinatensystem, welches überall mit der gleichen Genauigkeit angewendet werden kann. Deshalb haben internationale Gremien das WGS84 geschaffen (World Geodetic System 84). Die meisten nationalen Koordinatennetze sind mittlerweile auf das WGS84 umgerechnet worden. Dieses System ist mindestens in der Luftfahrt am gebräuchlichsten.

3. Was kann GPS heute?

3.1 Allgemein

GPS wird in erster Linie für die genaue Positionsbestimmung benutzt, und zwar zwei- oder dreidimensional, auf der Erdoberfläche und im erdnahen Weltraum. Durch rechnerische Bearbeitung der vermessenen Positionen können weiter auch Geschwindigkeit und Beschleunigung errechnet werden. Ferner können durch wiederholte oder unabhängige Positionsbestimmungen Distanzen gemessen werden (unabhängige Positionsbestimmung heisst: an zwei verschiedenen Orten wird zu verschiedenen Zeiten mit verschiedenen Geräten die Position bestimmt und daraus die Distanz berechnet). Auch eine Ausrichtung (Lage) im Raum kann, mittels zweier nahe beieinander liegender GPS-Empfänger, bestimmt werden. Zudem lassen sich mit GPS auch sehr genaue Zeitmessungen vornehmen (im Bereich von besser als einer Nano-Sekunde).

GPS bestimmt eine neue Position sehr schnell, nämlich in einem fixen Zeitraster von einer Sekunde. Einzig nach dem Einschalten des Gerätes muss etwa eine Minute gewartet werden, bis eine Positionsbestimmung möglich ist, sofern vor dem Ausschalten des Gerätes am selben Ort die Position bekannt war.

3.2 Genauigkeit und Funktionssicherheit

3.2.1 Verschiedene Betriebsarten

Das System arbeitet grundsätzlich in zwei verschiedenen Modi: einem präzisen, nur mit speziellem Code zugänglichen, und einem weniger präzisen, allgemein zugänglichen. Ohne Degradation können alle Empfänger die gleich hohe Genauigkeit erreichen, mit Degradation sinkt die Genauigkeit für die Geräte ohne Code. Degradation ist eine absichtliche (wie in unserem Fall) oder eine unabsichtliche Verschlechterung der Genauigkeit. Diese absichtliche Degradation wird mit „Selective Availability“ (SA) bezeichnet.

3.2.1.1 präziser Modus

Der präzise Modus erlaubt eine kontinuierliche Positionsbestimmung eines bewegten Empfängers mit einer Genauigkeit von ca. 15 Metern RMS (Root Mean Square, quadratischer Mittelwert). Eine Positionsgenauigkeit von 15 Metern RMS heisst, dass der Mittelwert der Positionsangaben über einen bestimmten Zeitraum eine Unsicherheit von durchschnittlich 15 Metern aufweist. Der Fehler zu einem bestimmten Zeitpunkt kann dabei aber um die 100 Meter betragen!

3.2.1.2 degradiertes Modus

Der unpräzise oder degradierte Modus erlaubt eine Genauigkeit von 15 bis ca. 100 Metern RMS, je nach Mass der Degradation. Das Mass der Degradation ist vom Systembetreiber steuerbar, vom Benutzer jedoch nicht direkt erkennbar.

3.2.1.3 Differential GPS (DGPS)

Mit einer genau vermessenen stationären Anlage kann die Genauigkeit in einem Umkreis von bis zu 500 km auch im unpräzisen Modus bis auf ca. 3 Meter RMS gesteigert werden. Die erzielbare Genauigkeit hängt vom Aufwand des Anlagenbetreibers ab. Die genau vermessene Bodenstation misst dauernd die durch GPS ermittelte Position und errechnet die Abweichung zur tatsächlichen, bekannten Position. Diese Abweichung wird in einem speziellen Datenformat (RTCM: Real Time Correction Typ M; es existiert auch ein RTCA) über einen Kommunikationskanal abgestrahlt. In der Aviatik werden dafür bisher VHF-Kanäle aus dem COM- oder NAV-Bereich benutzt. Für zivile Anwendungen werden auch normale Rundfunkstationen im Langwellen-, Kurzwellen- oder UKW-Bereich benutzt.

Die Idee von DGPS ist, dass alle Abweichungen (ob atmosphärisch oder durch SA bedingt) in einem kleinen Umkreis um eine fixe Station jeweils etwa gleich sind. Je näher man an der Referenzstation ist, um so genauer kann die eigene Position berechnet werden.

In der Schweiz werden solche Korrektursignale über die UKW-Sender Säntis, Rigi, Bantiger und La Dôle abgestrahlt. Die Referenzstation steht in Zimmerwald (westlich Flugplatz Bern). Dieser Dienst kann nur mit speziellen Empfängern genutzt und bei der Swisscom abonniert werden.

3.2.1.4 Pseudolites

Eine weitere Möglichkeit, um die Genauigkeit der Positionsbestimmung mittels GPS zu erhöhen, besteht darin, dass man „feststehende Satelliten“, sogenannte Pseudolites, benutzt. Dies sind Sender, die an einer genau vermessenen Lage am Boden stehen und Datentelegramme im selben Format aussenden wie die Satelliten. Da die Position der Bodenstationen aber sehr genau bekannt ist, ist auch die daraus berechnete Position entsprechend genau.

3.2.2 Funktionssicherheit

Die Funktionssicherheit des Systems hängt vom Zustand und der Konfiguration der Satelliten ab. Zurzeit sind normalerweise 24 Satelliten auf total 6 Umlaufbahnen operationell, weitere Satelliten sind als Reserve vorhanden. Ferner ist es immer möglich, bei Bedarf weitere Satelliten in eine Umlaufbahn zu bringen. Prinzipiell ist die Funktionssicherheit die gleiche wie bei jedem satellitengestützten System. Alle Satelliten sind mehr oder weniger empfindlich auf Störungen durch elektromagnetische Felder. Insbesondere können fast alle Satelliten (also auch diejenigen für TV, Radio, Telefon, Meteo usw.) durch einen NEMP (nuclear magnetic pulse, dies ist eine elektromagnetische Störung durch eine Atombombe) ausser Funktion gesetzt werden.

3.3 Integrität

Die meisten der heute verfügbaren Geräte sind nicht in der Lage, zu erkennen, ob die von den Satelliten empfangenen Signale allenfalls unzuverlässig sind. Die sogenannte Integrität ist also ohne Vergleich mit anderen Systemen noch nicht gegeben. Integrität ist eine enorm wichtige Eigenschaft einer Navigationshilfe, nämlich die Fähigkeit, allein aus den verfügbaren Daten des Systems jederzeit zu erkennen, ob die errechnete und angezeigte Position auch tatsächlich stimmt, oder ob verfälschte Daten zu einer falschen Positionsberechnung führen. Bei den konventionellen Navigationshilfen (VOR, ILS, MLS) wird Integrität dadurch erreicht, dass die Bodenanlagen sich dauernd selber überwachen, mit Hilfe von internen Überwachungsschaltungen und von externen Monitoren, und sich diese Anlagen im Fehlerfall automatisch innert weniger als einer Sekunde ab Auftreten eines Fehlers umschalten auf eine Reserveanlage und, falls der Fehler damit nicht behoben ist, sich die Anlagen komplett abschalten. Die Bordanlagen ihrerseits überprüfen dauernd, ob das empfangene Signal gültig ist. Falls ein fehlerhaftes oder fehlendes Signal erkannt wird, zeigt die Bordanlage ein Flag.

Wenn Integrität nicht gegeben ist, kann ohne Vergleich mit weiteren Systemen nicht festgestellt werden, ob die angegebene Position überhaupt möglich ist. Wenn z.B. in einem GPS-Satelliten die Uhr um eine Mikrosekunde falsch läuft, ergibt dies einen Positionsfehler von 300 m. Die bis heute verwendeten GPS-Geräte haben keine Anzeige, die darauf hinweist, dass die Integrität (möglicherweise) nicht gegeben ist.

3.4 RAIM

Ein Ansatz Richtung Integrität besteht darin, dass die Empfänger aus den Bahndaten und der bekannten Position berechnen, ob für die nähere Zukunft jeweils genügend Satelliten in guten Positionen zu erwarten sind, damit grundsätzlich die Voraussetzungen für eine gute Positionsbestimmung gegeben sind. Diese Berechnungsmethode heisst RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring). Aber auch diese Methode garantiert noch nicht, dass die aus den Satellitendaten berechnete Position immer korrekt ist.

3.5 Verknüpfung mit Karten

Die meisten in der Aviatik eingesetzten GPS-Geräte verfügen über interne Datenbanken, in denen Flugplätze, Standorte und Frequenzen von konventionellen Navigationshilfen usw. einprogrammiert sind oder über eine Schnittstelle eingegeben werden können. Bei vielen Geräten sind zusätzlich Informationen über die Luftraumstruktur vorhanden, bei einigen Geräten sind auch terrestrische Informationen (meistens

Strassen, Flüsse, Seen, Bahnlinien und ähnliches) einprogrammiert. Mit einiger Vorsicht können so ausgerüstete Geräte teilweise als Kartenersatz dienen. Allerdings ist zu beachten, dass für die Korrektheit der terrestrischen Informationen in der Regel keine Garantie übernommen wird.

4. Stärken des GPS

Das GPS-System ist zweifellos ein sehr interessantes System mit vielen guten Eigenschaften. Es ist aber wichtig, darob die Mängel sowohl des Systems wie auch der Geräte nicht zu übersehen.

4.1 Gute Zugänglichkeit

Eine ganz grosse Stärke des GPS-Systems ist die weltweite Verfügbarkeit rund um die Uhr, welche an keine vertraglichen Bedingungen seitens der Benutzer geknüpft ist. Ferner braucht der Benutzer lediglich einen Empfänger, ohne Sender, was einen batteriesparenden Betrieb erlaubt. Zudem benötigt man keine Konzession zum Betreiben eines GPS-Gerätes. Zudem sind die Geräte schon sehr preiswert, die günstigsten Geräte sind für ca. Fr. 300.- zu kaufen.

4.2 Hohe Genauigkeit

Die mit GPS erreichbare Genauigkeit ist für En-Route-Navigation in jedem Fall jedem anderen Navigationssystem überlegen. Eine weltweite Positionsgenauigkeit von 100 Metern deckt wirklich alle Bedürfnisse für die VFR-Fliegerei ab. Falls die Koordinaten bekannt sind, kann jeder Punkt von überall her direkt angefliegen werden, sogar der Rote Platz in Moskau, ohne dass man dazu Karten benötigt.

4.3 Viele Zusatzfunktionen

Die meisten Geräte gestatten nicht nur eine Positionsbestimmung, sondern stellen vielfältige Zusatzfunktionen zur Verfügung, von denen hier nur einige beispielhaft aufgeführt werden können: Ermitteln eines Kurses über Grund; Ermitteln der Groundspeed; Berechnen des aktuellen Windes (Richtung und Stärke); Ermitteln des Sonnenauf- und Unterganges für jeden beliebigen Punkt auf der Erde an jedem beliebigen Datum; Berechnen und Anzeige der benötigten Zeit zu einem Punkt mit der aktuellen Geschwindigkeit; nach Eingabe von Benzinmenge und Fuelflow Berechnung der verbliebenen Endurance; Vorausprogrammierung eines Flugweges mit der Möglichkeit, daraus eine Flugplanung mit Flugzeit, Distanz, Headings, Fuel-Verbrauch zu ermitteln, sowie später das Flugzeug mit diesen Daten durch den Autopiloten fliegen zu lassen.

5. Schwächen des GPS

5.1 Frequenz nicht geschützt

Eine der grössten Schwächen des GPS ist, dass die Frequenzen nicht geschützt sind. Das heisst, dass theoretisch andere Dienste dieselben Frequenzen ebenfalls benutzen dürfen, sofern sie Bandplan-konform sind.

5.2 US-Militär ist zuständig

Eine weitere Schwäche ist, dass das amerikanische Militär die ganze technische und operationelle Verfügungsgewalt über das System hat. Theoretisch kann also das Militär jederzeit und ohne Vorwarnung das System unbenutzbar machen; praktisch ist das Militär durch die Vereinbarung mit dem DOT daran gebunden, das System verfügbar zu halten. Das Ein- und Ausschalten der Selective Availability untersteht aber noch immer dem Militär.

5.3. Leichte Störbarkeit

Da die GPS-Signale extrem schwach sind, genügt bereits ein kleiner Störsender, um das GPS-Signal in einem grösseren Bereich völlig unbrauchbar zu machen. Bekannt sind unter anderem folgende Fälle:

Im Tessin kann das GPS südlich des Ceneri eine falsche oder gar keine Position liefern (trotz genügend Satelliten), weil in Norditalien ein Radar der NATO betrieben wird, bei dem Oberwellen mit den GPS-Frequenzen zusammenfallen und damit das Signal unbrauchbar machen.

In den USA gibt es ein Gebiet mit einer Ausdehnung von ca 180 km Durchmesser, in dem eine Positionsbestimmung mittels GPS nicht möglich ist, weil ein starker Fernsehsender Oberwellen im Bereich der GPS-Frequenzen abstrahlt.

Ein guter Bastler kann mit einfachen Mitteln einen Störsender bauen, der - mit einer normalen 1,5V-Batterie betrieben - ein Gebiet mit einem Radius von bis zu 50 km für GPS-Navigation unbenutzbar machen kann.

Diese Schwäche ist ein eklatanter Nachteil gegenüber allen konventionellen Navigationshilfen, welche nur in genügender Entfernung leicht gestört werden können mittels Störsendern. In der Nähe der Bodenstation ist das Signal in der Regel zu stark, als dass es auf diese Art nachhaltig gestört werden könnte.

ILS-Signale können allerdings auf eine ganz andere Art gestört werden, nämlich durch Reflexion der stark gebündelten Signale an metallischen Gegenständen, die in der Nähe der Antennen abgestellt werden.

Diese Art Störungen betreffen auch die ILS-Anlagen in Zürich (vor allem Baukräne, zum Teil Lastwagen, aber auch an ungünstigen Orten abgestellte Flugzeug kommen als Störer in Frage).

5.4 Fehlende Integrität

Die fehlende Integrität (siehe auch 3.3 und 3.4) bedingt, dass die von GPS ermittelten Positionen zwingend mit anderen Mitteln überprüft werden. In Frage kommen alle Methoden, welche nicht auf GPS basieren, also terrestrische Navigation, ferner konventionelle Radio-Navigation (z.B. Overlay-Approaches), Trägheitsplattformen usw.

6. Zukünftige Entwicklung

6.1 Weiterentwicklung von GPS

Das heutige GPS hat noch ein grosses Potential zur Weiterentwicklung. Insbesondere sollen die Satelliten noch zuverlässiger werden und noch stabilere Uhren an Bord haben. Bei den Bodenanlagen soll die Synchronisation untereinander verbessert werden, damit im präzisen Modus eine noch höhere Genauigkeit erreicht werden kann. Weitere Verbesserungen sind auch auf der Empfänger-Seite möglich, indem die Geräte mit anderen Systemen (Trägheitsplattformen INS, Beschleunigungssensoren, Winkelgeber, Faserkreisel, Doppler-Radar usw.) verknüpft werden. Zudem könnten die Satelliten besser überwacht und der Status aller Satelliten in Echtzeit über einen gesonderten Kanal übermittelt werden. Es ist möglich, dass der bisherige genaue Modus bald gegen Entrichtung einer Gebühr frei benutzt werden kann. Diese Gebühr würde beim Kauf oder bei der Registrierung eines geeigneten Gerätes erhoben.

Ferner planen die Militärs, eine weitere, dritte Frequenz einzuführen, mit welcher die Genauigkeit weiter erhöht und die Störanfälligkeit reduziert werden könnte.

6.2 Entwicklung neuer Systeme

Um die Anliegen der Aviatik optimal zu berücksichtigen, insbesondere die Forderung nach Integrität, sind neue, unabhängige Satellitensysteme geplant. Diese Projekte sind bekannt unter der Sammelbezeichnung GNSS (Global Navigation System by Satellites). Die theoretischen Grundlagen und die Konzepte für diese Systeme sind fertig. Was fehlt, ist ein Konzept für die Finanzierung.

2. Teil: Anwendung des GPS in der Aviatik

1. Grundlagen

Die Navigation mit GPS basiert auf den bisher bekannten Navigationselementen, speziell auf den vorhandenen Flugplätzen. Allgemein wird das Koordinatensystem WGS84 verwendet. Die bei uns üblichen GPS-Geräte verwenden die Signale des amerikanischen GPS-Systems. Einzelne Geräte können auch die Signale des GLONASS verarbeiten.

2. Elemente

Für einen Einsatz in der Aviatik benötigt man ein geeignetes Gerät, welches in der Lage ist, auch bei schnelleren Bewegungen des Flugzeuges eine Position zu berechnen. Ferner sollte dieses Gerät in der Lage sein, die Position bezüglich von fliegerisch interessanten Merkpunkten wie Flugplätzen, VOR usw. anzugeben. Für eine Integration mit einem Autopilot sind auch entsprechende Schnittstellen notwendig. Zudem benötigt jedes GPS-Gerät eine Antenne, die freie Sicht auf die Satelliten hat. Aus diesem Grund sind fest eingebaute Antennen denjenigen von Portabelgeräten immer vorzuziehen.

Viele eingebaute GPS-Geräte haben Anschlüsse für externe Sensoren. Als Sensoren kommen in Frage: Separater Höhenmesser/Altitude Encoder zur Unterstützung des GPS; Sensor für LORAN, um schneller eine Position berechnen zu können; Fuel/Air Data Sensor zur Berechnung des Benzinverbrauchs oder der Höhe; Heading-Sensor und Air Speed Sensor zur Berechnung des Windes usw. Ferner können Ausgabegeräte am GPS angeschlossen sein, z.B. ein Moving Map Display, ein CDI, eine Schnittstelle zum Autopilot.

3. Bedienung

Da die Bedienung der GPS-Geräte sehr unterschiedlich ist, kann hier kein allgemein gültiges Vorgehen beschrieben werden. In jedem Fall ist das Manual des jeweiligen Herstellers verbindlich. Trotzdem sind ein paar allgemein gültige Hinweise nützlich. Die meisten Geräte haben sowohl Tasten als auch Drehknöpfe zur Wahl der Funktionen. Der grössere, äussere Drehknopf wird meist benutzt, um eine bestimmte Stelle auf dem Display zu erreichen; der kleinere, innere Drehknopf wählt den Inhalt der betreffenden Stelle aus.

3.1 Inbetriebnahme

Bei eingebauten GPS-Geräten müssen in der Regel der Battery Master und der Radiomaster eingeschaltet sein, bevor das Gerät selber eingeschaltet werden kann. Beim Garmin GNC250XL, welches im HB-PDU eingebaut ist, kann das Gerät auch direkt eingeschaltet werden, da es über eine eingebaute Stromversorgung verfügt.

3.2 Selbsttest

Bei der Inbetriebnahme eines GPS-Gerätes läuft in der Regel ein Selbsttest ab. Dabei werden die Hardware und die Software des Gerätes geprüft. Ferner werden bei integrierten Systemen auch die Schnittstellen zu den angeschlossenen Sensoren geprüft. Die externen Geräte hingegen werden in der Regel nicht mitgeprüft. Beim Selbsttest werden verschiedene Meldungen angezeigt. Je nach Hersteller beinhalten diese Meldungen ganz unterschiedliche Informationen. Mögliche Anzeigen sind: Information über den Hersteller, Begrüssungsseite, Name des Benutzers, Informationen zur Datenbank (Version, Ablaufdatum), aktuelle Zeit und Datum, Anzeigen über die verfügbaren Satelliten (Nummer des Satelliten, zugehörige Signalstärke), berechnete oder letzte bekannte Position, geschätzte Genauigkeit der berechneten Position (zum Teil separate Angabe nach horizontaler und vertikaler Position), Betriebsbereitschaft (NO Position, ready for Nav 2D oder 3D usw..)

3.3 Datenbank

Damit GPS in der Fliegerei sinnvoll angewendet werden kann ist es notwendig, Geräte mit geeigneten Datenbanken zu versehen. Je nach Gerät sind diese Datenbanken von verschiedenen Herstellern verfügbar. Jede Datenbank ist mit einem Ablaufdatum versehen. Beim Selbsttest wird angezeigt, ob die Datenbank noch gültig ist. Bei einigen Geräten (z.B. bei dem in unseren Flugzeugen eingesetzten Apollo 2001) wird bei abgelaufener Datenbank immer eine „old Message“ angezeigt; deshalb kann die Message-Anzeige nie gelöscht werden.

Es gibt Datenbanken, die nur ein begrenztes Gebiet abdecken, und solche, welche die ganze Erde abdecken. Der Inhalt der Datenbanken kann sehr unterschiedlich sein. In den für die Aviatik benutzten Datenbanken sind in der Regel mindestens die Flugplätze enthalten, oft mit zusätzlichen Angaben wie Frequenzen, Pistenrichtung und -länge sowie Belagsart, Verfügbarkeit von Fuel, Distanz zu Nav aids oder grösseren Orten, ICAO-Kennung und lokale Bezeichnung, usw. Zusätzlich werden meistens auch die Positionen und Frequenzen von VOR und NDB angezeigt. Manchmal sind auch Luftraumstrukturen in den Datenbanken enthalten.

Zum Teil sind in den Datenbanken auch terrestrische Informationen enthalten wie Seen, Flüsse usw.. Bei einigen Geräten kann die interne Datenbank über eine Schnittstelle aktualisiert werden, bei anderen muss die ganze Datenkarte ausgetauscht werden.

Viele Geräte haben Anschlüsse zur Weiterverarbeitung der Koordinaten in externen Geräten, z.B. in einem Moving-Map-Display. Dies kann ein spezialisiertes Gerät sein, wo man eine Karte einlegen kann, und wo dann ein Cursor nach einer vorhergehenden Eichung die genaue Position anzeigt, oder ein Anschluss zu einem Computer mit einer Software, welche die erhaltenen Position in eine Anzeige auf einer digitalen Karte umwandeln kann. Teilweise können solche externen Geräte auch den Flugweg dreidimensional inklusive Geschwindigkeit aufzeichnen.

3.4 Einstellungen

Die meisten Geräte haben eine Grundeinstellung für die Anzeige. Diese Grundeinstellung lässt sich oft auch programmieren. Ferner lassen sich meistens die gewünschten Einheiten programmieren, die Zeit kann als Zonenzeit oder als UTC angegeben werden, usw..

Viele Geräte haben die Möglichkeit, Alarime anzuzeigen, wenn man beispielsweise sich einem kontrollierten Luftraum nähert. Die Alarime können im Menu SETUP ein- oder ausgeschaltet werden. Erreichen des SETUP-Menüs: Beim Apollo: SYS-Taste drücken. Beim Garmin: 2 Sekunden auf MSG drücken.

Die meisten Geräte haben zudem Funktionen wie:

NAV-Mode, wo die aktuellen Nav-Informationen angezeigt werden wie: Groundspeed, Position, Track, Bearing und Distanz zu einem Waypoint, CDI, Skala der Anzeige (Garmin), ...

DB-Mode (Apollo) oder WPT-Mode (Garmin) zum Arbeiten mit Waypoints, Airports, VOR, NDB, User points, Intersections. Hier findet man alle Informationen zu den Waypoints wie Name, Frequenz, Koordinaten, Pistenlänge und -richtung, Info über Beleuchtung, Verfügbarkeit von Fuel usw.

FPL-Mode (Apollo) oder RTE-Mode (Garmin) für Flugplanung (Route mit einem Namen, mit Waypoints). Bis zu 10 Flugpläne mit jeweils max. 20 Legs (Apollo) resp. bis zu 20 Flugpläne mit max. 31 Waypoints (Garmin) können vorprogrammiert und gespeichert werden. Jeweils einer dieser Flugpläne kann aktiviert werden.

Direct To-Mode (Apollo und Garmin), um irgend einen gespeicherten Waypoint direkt anzusteuern. In dieser Betriebsart kann auch direkt ein gewünschter Kurs zur Anzeige auf dem CDI eingegeben werden. Emergency-Mode (Apollo) resp. Nearest-Mode (Garmin), um die nächsten 20 (Apollo) resp 9 (Garmin) Waypoints (Flugplätze, VOR, NDB, User, Intersections, spezielle Lufträume) zu finden. Dabei werden jeweils der Kurs, die Distanz sowie je nach Waypoint weitere Informationen angezeigt. Die in diesem Mode anzuzeigenden Flugplätze können eingeschränkt werden nach Pistenlänge und Belagsart (beide Geräte) sowie nach Vorhandensein einer Beleuchtung (nur Apollo).

Message-Mode (beide Geräte), um irgendwelche Warnungen anzuzeigen. Diese Warnungen können vom Gerät erzeugt sein (Luftraum, Empfangsprobleme, Annäherung an Waypoint, abgelaufene Datenkarte) oder vom Benutzer programmiert (eingestellte Zeit ist abgelaufen). Vom Gerät erzeugte Warnungen können teilweise ein- und ausgeschaltet werden.

3.5 Programmierung vor dem Flug, Flugvorbereitung

Die Möglichkeit, Flugwege zu programmieren, kann für die Flugvorbereitung und für die Flugdurchführung genutzt werden.

Bei der Flugvorbereitung ist dies eine praktische Möglichkeit, Distanzen, Kurse, Flugzeiten usw. zu berechnen, ohne über die dazu sonst notwendigen Karten zu verfügen.

Mittels separat erhältlicher Datenkarte kann man die Flugvorbereitung zuhause durchführen, und anschliessend die Karte ins Gerät im Flugzeug einschieben. Mit einem zusätzlichen PC-Set kann die Flugplanung sogar auf dem PC durchgeführt und anschliessend auf die Datenkarte überspielt werden. Zudem kann damit bei gewissen Geräten (z.B. King-Bendix KLX100) der geflogene Flugweg wieder in den PC zurückgespielt und anschliessend ausgedruckt werden.

3.6 Anwendung im Flug

Bei der Flugdurchführung kann der Pilot durch die Informationen des GPS bezüglich Headings, Flugzeiten, Ausweichen bei kontrollierten Lufträumen usw. sehr entlastet werden. Die Anzeige des Kurses kann auch über das externe CDI erfolgen. Zudem kann mit Hilfe eines solchen Flugplanes ein ganzer Flugweg mit dem GPS automatisch abgeflogen werden. Die Höhe muss allerdings noch von Hand geflogen werden, ebenso die Speed.

Auch wenn man nicht mit einem Flugplan fliegt, ist das GPS sehr hilfreich im Flug. Man kann sehr schnell und leicht die Groundspeed ermitteln. Wenn man zudem einen Waypoint anfliegt, kann man direkt die EET oder die ETA ablesen, je nach Einstellung. Dies funktioniert auf beliebige Distanzen. Man kann also schon beim Start in Biarritz recht genau ermitteln, wann man in Grenchen ankommen wird (vorausgesetzt, das Benzin reicht, und man muss nicht wegen Wetter ausweichen).

Bei DME stimmt die angezeigte GS nur, wenn man direkt auf eine DME-Station zu oder direkt von ihr wegfliegt. Beim GPS hingegen wird die korrekte GS dauernd angezeigt, sogar während man einen Vollkreis fliegt. Man kann damit auf einfache Art die Windrichtung und die Windstärke erfliessen.

Eine andere sehr praktische Anwendung ist das Erfliessen des WCA, ohne den Wind kennen zu müssen. Dazu wählt man eine Anzeige, wo man gleichzeitig DTK (desired Track) oder BRG (Bearing) und actual Track sieht. Wenn DTK/BRG und Actual Track übereinstimmen, ist der korrekte WCA gefunden. Wenn also der Actual Track 10° kleiner ist als DTK/BRG, so genügt als erste Korrektur eine Erhöhung des Headings um 10° . Anschliessend ist ev. nochmals eine Korrektur von 1° bis 2° notwendig.

Wenn man mit einem programmierten Flugplan fliegt, kann man der Aufforderung „proceed direct from present position to ...“ ganz elegant nachkommen, indem man die Taste „Direct To“ betätigt, und anschliessend den gewünschten neuen Waypoint eingibt (auch Auswahl aus dem Flugplan ist möglich; es muss nicht unbedingt der nächste Punkt im Flugplan sein). Unmittelbar nach Bestätigung dieser Eingabe mit Enter wird der neue Kurs und die Distanz sowie die Zeit angezeigt (sofern in der Anzeige gewählt).

4. Einschränkungen / Bemerkungen

Die GPS-Geräte sind zwar sehr leistungsfähig und mit einiger Übung auch ziemlich einfach zu bedienen. Wegen des grossen Komforts könnte man leicht nachlässig werden und sich voll auf das Gerät verlassen, ohne Backup mit Karten und anderen Nav aids. Es soll Leute geben, die sogar so riesige Distanzen wie einen Flug von Grenchen nach Langenthal oder umgekehrt ausschliesslich nach GPS fliegen, ohne die Einflugpunkte oder Sektoren überhaupt zu kennen...

GPS ist zwar unter normalen Bedingungen ein äusserst zuverlässiges Navigationsmittel. Dennoch sollte man sich nie auf ein einzelnes Navigationsgerät verlassen. Es ist äusserst wichtig, stets die Orientierung unter Verwendung aller verfügbaren Daten und Ressourcen zu wahren. Speziell bei VFR ist es

unabdingbar, trotz GPS-Empfänger(n), weiterhin nach geographischen Anhaltspunkten zu navigieren und vor allem eine lückenlose Luftraumüberwachung durchzuführen!

Vor allem bei Flügen mit nur einem Piloten ist die Versuchung gross, sich voll auf das GPS abzustützen. Wenn dann noch die Gerätekenntnis nicht optimal ist, steckt der Kopf bald mehr im Cockpit als draussen. Dies ist das Gefährlichste am GPS, dass die Luftraumüberwachung vernachlässigt wird.

5. Ausblick

Die GPS-Geräte werden immer leistungsfähiger, kleiner und billiger. Dies führt dazu, dass immer mehr Piloten diese Geräte verwenden. Wenn die Geräte sinnvoll eingesetzt werden, indem sie z.B. durch einen zweiten Piloten bedient werden, welcher dann auch noch für die Überwachung der GPS-Funktionen zuständig ist, können diese Geräte eine grosse Erleichterung sein und zur sicheren Flugdurchführung beitragen.

Mit den heute verfügbaren Systemen ist aber mehr als eine En-Route-Navigation noch nicht möglich.

Mit den geplanten Erweiterungen des GPS-Systems zum GNSS werden in Zukunft auch Anflüge auf Flugplätze möglich. Bis aber Anflüge bis auf Stufe Kategorie III möglich werden, muss noch viel Entwicklungsarbeit geleistet werden. Optimisten rechnen damit, dass Anflüge Kat III bis in ca. 10 Jahren verfügbar sein werden, Pessimisten gehen davon aus, dass auch im Jahre 2015 solche Anflüge nur unter ganz speziellen Bedingungen möglich sein werden, wenn überhaupt.

Das Problem sind nicht die Geräte an sich, sondern einerseits die noch immer vorhandenen Schwächen des Systems (siehe 1. Teil, Punkt 5), andererseits die unterschiedlichen Ansprüche der künftigen Nutzer, welche eine einheitliche Systemspezifikation für ein neues System sehr erschweren, und schliesslich die ungelöste Frage der Finanzierung. Für die bisherigen Navigationseinrichtungen mussten jeweils die betroffenen Länder resp. die betroffenen Flughäfen aufkommen. Mit einem neuen System könnte sofort jeder Nutzer irgendwo voll profitieren, ohne eigene Leistungen zu erbringen.

Dafür ist es durchaus denkbar, dass die teuren künstlichen Horizonte schon in absehbarer Zeit durch ein GPS-Gerät mit drei Empfangsantennen (je eine pro Flügel, eine auf dem Höhenleitwerk) ersetzt werden können. Versuchsarrangements dazu haben die Machbarkeit bestätigt. Bis jetzt sind die notwendigen Rechner im GPS noch zu teuer, doch dies dürfte sich schon bald ändern.

[Verzeichnis Dokumente](#)
[home](#)