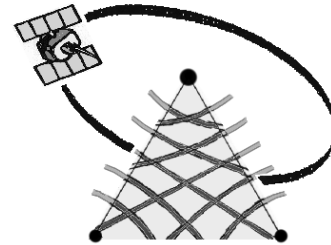


FUNKNAVIGATION ENTWICKLUNG UND ZUKUNFT

Dipl.-Ing. U. Petersen*



Mit dieser 30.Folge (GPS feiert 2018 seinen 40. und GALILEO IOC den 1. Geburtstag) möchte ich mich mit 85 Jahren von meinen Lesern verabschieden. Es war eine schöne Beschäftigung als Übergang und im Ruhestand kritisch die Funknavigation in ihrer Entwicklung mit den Hintergründen zu beobachten und Sportschiffen zugänglich zu machen.

22. Febr. 1978, Start 1. Block I–Satellite Navstar-GPS (Navigational Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System)

6. Jan. 1980, 0 Uhr UTC beginnt die **GPS-Wochenzählung**, jeweils 1 bis 1024 (10 bit), 1.Zählerrücksetzung **23. Aug. 1999**, nächster Termin **7. Apr. 2019**. Große Probleme bei den GPS-Anlagen sollte es auch diesmal nicht geben.

1985, GPS beginnt NNSS (Navy Navigational Satellite System) auch als TRANSIT bekannt zu ersetzen.

März 1989, Gründung High Level Group (HLG) aus ESA, EUROCONTROL, EU-Komm. für Verhandlungen mit USA über Beteiligung und Kontrolle GPS, erfolglos.

27. Apr. 1995, GPS für militärische Zwecke als voll einsatzfähig freigegeben (FOC).

17. Juli 1995, U.S. Verkehrsministerium erklärt GPS voll verwendungsfähig für zivile Nutzer.

18. Jan. 1996, Rußland erklärt GLONASS als voll verwendungsfähig (FOC). Die Voraussetzung bestand nur 6 Monate.

17. Juni 1999, EU-Ministerrat Entscheidung GALILEO, Definitionsphase

Mai 2000, die künstlichen Signalverschlechterung (SA) beim "Global Positioning System" (NAVSTAR-GPS) wird vorfristig, wirtschaftlich bedingt zurückgenommen.

Frühjahr 2001, das BMVBW¹ überraschte mit der Aussage, daß sich die Bundesrepublik Deutschland bei der Schiffssicherheit nur noch auf **GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS und/oder GALILEO)** stützen werde. Eine Absicherung von GNSS sei nicht erforderlich, als Backup genügten die an Bord vorhandenen Einrichtungen wie z.B. Inertialsysteme, Echolot usw. Diese gefährliche Entscheidung gilt offenbar weiterhin.

Ende September 2001, das BMBF² warnte im Gegensatz dazu vor möglicherweise eingeschränkter Verwendbarkeit von GPS!

26. März 2002, die Entscheidung der europäischen Verkehrsminister für den Aufbau von GALILEO fällt mit 15 Monaten Verzug.

26. Juni 2004, USA und EU unterzeichneten ein Abkommen über einheitliche Signalstrukturen bei GPS und GALILEO. Damit schien der Weg für ein echtes Kombisystem geebnet.

15. Dez. 2004, Anweisung des U.S. Präsidenten NSPD-39, National Security Policy bezüglich Position, Navigation und Zeit (PNT), fordert u.a. Entwicklung und Realisierung von Redundanz zu GPS.

28. Juli 2005, EGNOS erhält Initial Operational Capability (IOC)

28. Dez. 2005, der erste Galileo-Testsatellit (GIOVE-A, **Galileo In-Orbit Validation Element**)

¹ Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen

² Bundesministerium für Bildung und Forschung

wurde gestartet, am 26. Apr. 2008 folgte GIOVE-B.

Okt. 2006, China veröffentlichte Einzelheiten seines geplanten Satelliten-Navigationssystems **BeiDou/COMPASS**.

18. Sept. 2007, das Weiße Haus gab bekannt, daß zukünftige GPS-Satelliten nicht mehr die SA-Befähigung besitzen müßten. Dies gilt für die GPS III-Generation, erster Start frühestens 2014. Bereits 1995 auf der Sat.-Nav.-Tagung in Palm Springs bezeichnete Dr. James R. Schlesinger (US Verteidigungsminister 1973 bis 1975) SA als kontraproduktiv.

7. Febr. 2008, USA entscheiden, LORAN modifiziert als **eLORAN** zum Schutz der Infrastruktur als **Redundanz zu GPS** einzurichten. An dieser Entscheidung war der als Vater von GPS bekannte Prof. Bradford Parkinson wesentlich beteiligt.

Jan. 2009, Veröffentlichung des Untersuchungsberichts „**Summary of Initial Findings on eLoran**“. Der Bericht wurden auf Veranlassung von DoT und DHS (Ministerium für Nationale Sicherheit) von einem Independent Assessment Team (IAT) des Institute for Defense Analyses (IDA) unter Vorsitz von Prof. Bradford Parkinson, (Vater von GPS) bereits am 13. Dez. 2006 den Auftraggebern vorgelegt, im März 2007 akzeptiert, damals aber nicht veröffentlicht. Er war Grundlage für die US Entscheidung zu eLORAN vom 7. Febr. 2008.

Feb. 2009, Veröffentlichung des **US Federal Radionavigation Plan (FRP) 2008**, unterzeichnet von Secretary: DoT, Mary E. Peters 04.12.08; DoD, Robert M. Gates, 23.01.09; DHS, Michael Chertoff, 16.01.09. Danach soll **eLORAN als Redundanz für GPS** dienen.

März 2009, der US Haushaltsplan für 2010 erscheint, Wegfall der Mittel LORAN (DHS, USCG), Ersparnis 2010 \$36 Mio. und \$190 Mio. über 5 Jahre.

USCG hat aber bereits 20 von 24 LC-Stationen modernisiert und fähig für eLORAN gemacht.

30. Apr. 2009, die **“GPS Civil Monitoring Performance Specification“** werden vom DoT veröffentlicht.

07. Mai 2009, der Untersuchungsbericht des US Government Accountability Office (GAO) **„GPS Significant Challenges in Sustaining and Upgrading Widely Used Capabilities“** erscheint mit Hinweisen auf erhebliche Mängel bei der Kompetenz, Satelliten-Auftrags - definition und -vergabe sowie der Satelliten-Produktion und ihrem Betrieb. Es gibt 2 Fassungen der Studie, lang 61 und kurz 15 Seiten! Die Air-Force hält dagegen, es werden ständig 24 Satelliten in Betrieb sein. Auf einige dieser Mängel wies bereits eine frühere Studie (Defence Science Board) hin.

Auch in der 15. Folge (2003) meiner vorliegenden Veröffentlichung verwies ich schon auf wesentliche Mängel (überalterte Satelliten).

29. Juni 2009, der EU Rechnungshof veröffentlicht seinen Sonderbericht Nr. 7/2009 **„Verwaltung der Entwicklungs- und Validierungsphase des Projektes GALILEO“** (untersuchter Zeitraum bis 2006), mit erheblichen Vorwürfen hinsichtlich Organisation und Finanzen.

01. Okt. 2009, für **EGNOS** erfolgt die Freigabe des Open Service (OS).

28. Okt. 2009, US Präsident **Obama** unterzeichnet ein Gesetz, daß es **erlaubt LORAN im Jan 2010 abzuschalten**, da GPS alle Bedürfnisse erfüllt. Notwendige Voraussetzungen sind die Unterschriften der Leiter von Coast Guard und DHS.

01. Dez. 2009, die Zustimmung des Kommandanten der US Coast Guard erfolgt, das DHS allerdings will GPS-Redundanz wegen der Gefahren für die Infrastruktur der USA nochmals überdenken.

Dez. 2009, Internationale Seezeichen Verwaltung (IALA) veröffentlicht ihren World Wide Radio Navigation Plan.

01. Febr. 2010, EU veröffentlicht Spezifikationen für GALILEO Open Service (OS) **„Signal In Space Interface Control Document“** (OS SIS ICD Issue 1, vergleichbar GPS-IS-200E).

08. Feb. 2010, Loran-C wird von den USA weitgehend abgeschaltet, Haushaltsmittel waren gestrichen worden.

26. Jan. 2011, US Federal Communications Commission (FCC) erteilt Firma **LightSquared** vorläufige Genehmigung eines landesweiten, terrestrischen Mobilfunk-Netzes (LTE) unter Verwendung eines Satelliten-Mobilfunkbandes angrenzend an das geschützte Frequenzband für Satelliten-Navigation.

- 22. Dez. 2011, GLONASS** wird mit 24 Satelliten von Rußland **erneut** als **voll betriebsklar erklärt** (FOC).
- 27. Dez. 2011,** China erklärt **BeiDou/COMPASS** als verwendungsfähig für China und angrenzende Gebiete (IOC).
- Anfang 2012,** Nordkorea betreibt einen **leistungsstarker Störsender**, als Folge melden innerhalb von ca. 14 Tage über 1000 Flugzeuge und 250 Schiffe **GPS-Ausfall**. Störsender war auch in der Folgezeit unregelmäßig in Betrieb.
- 26. Dez. 2012** China veröffentlicht für **Open Service** von **BeiDou/COMPASS** die **SID** (signal-in-space dokument), damit ist diese Betriebsart öffentlich nutzbar.
- 17. Jan. 2013** Erste Aussendung Galileo Navigationssignale.
- 12. März 2013,** Erste Positionsbestimmung anhand der 4 Galileo-IOV-Satelliten, Fehler 10-15m sowohl horizontal als auch vertikal.
- 01. Juli 2013,** Indien startet ersten **Indian Regional Navigation Satellite System-1A (IRNSS)**
- 06. Nov. 2013,** GOA veröffentlicht Report „GPS Disruptions“ mit der Klarstellung, daß die Anweisung NSPD-39 vom 15. Dez. 2004 hinsichtlich GPS-Redundanz bisher nicht erfüllt wurde.
- 01. April 2014,** 11 Stunden **Totalausfall GLONASS** (01.04. 21:15 UTC bis 02.04. 07:30 UTC) infolge Software-Fehlers übermittelt an sämtliche Satelliten.
- 22. Aug. 2014** Zwei Galileo-Satelliten erreichen wegen Raketenfehler vorgesehene Bahn nicht.
- 17. Nov. 2014** Erster Start 4 Galileo-Satelliten, bisher nur jeweils 2 Satelliten
- Mai 2015,** Veröffentlichung des **US Federal Radionavigation Plan (FRP) 2014**
- 31. Okt. 2015,** **UK eLORAN IOC** für 7 Ostküstenhäfen
- 01. Dez. 2015,** Trinity House, Notice to Mariners 27/2015, **Ende** von **LORAN-C** und **eLORAN in Nordeuropa**
- 26. Jan. 2016,** **Zeitsignalstörung GPS** (15 Sat.) Auswirkung über ca. 2 Tage weltweit, Software-Fehler beim Abschalten SVN 23/ PRN 32, nach 25 Jahre
- 15. Dez. 2016,** **IOC Galileo** (11 Sat. SAR, OS, PRS, mindestens 4 Satelliten weltweit noch nicht jederzeit nicht gewährleistet)
- Dez. 2017,** **BeiDou** 3 GEO, 8 ISGO und 8 MEO Satelliten betriebsklar.

Die Eigenschaften des von aller Welt genutzten GPS sind von außen gesehen ohne Zweifel hervorragend. Seit längerem wird jedoch offen über die Gefahren gesprochen, GPS als einziges Navigationssystem zu verwenden. Sogar Prof. Bradford Parkinson, Vater von GPS, verwies schon auf der Sat. Nav. Tagung GNSS 07 (Mai 07, Genf) auf die gefährlich einseitige Abhängigkeit vom GPS L1 C/A-Signal. Er forderte dringend, Nutzung und Gerät robuster zu machen. Die US President`s Commission on Critical Infrastructure Protection hatte ebenfalls bereits 1997 ausdrücklich auf die Störanfälligkeit von GPS hingewiesen. Auch die Studie des VOLPE Research Center (10.Sept.2001 veröffentlicht) machte deutlich, daß GPS-Redundanz-Systeme zur Sicherung unabdingbar sind. Die Präsidenten-Anweisung NSPD-39, 15.Dez. 2004, fordert dies dann von den U.S. Ministerien DoT und DHS. Diese Anweisung wurde bisher nicht ausgeführt. Nach einem Report vom 04.Nov. 2010 soll das National Position, Navigation and Timing Advisory Board GPS zur kritischen Infrastruktur erklären und das DHS mit der Betreuung beauftragen. Die General Lighthouse Authorities (GLA, England) kamen in einer Studie (May 2006) zu der Erkenntnis, daß für die Satelliten-Navigation eine Bedrohung durch Störungen, nicht nur terroristischen oder kriminellen Ursprungs, mit erheblichen ökonomischen und finanziellen Folgen besteht und deshalb ein Redundanz-System unabdingbar sei. **Global Navigation Space Systems: reliance and vulnerabilities** Studie von The Royal Academy of Engineering, März 2011 (www.raeng.org.uk). Eine Studie der London Economics (LE 2017) ergab für einen **5tägigen GNSS-Ausfall** allein für **UK Kosten von € 5,9 Milliarden**. Statt dessen begab man sich, alle Warnungen aus Fachkreisen ignorierend, verstärkt in die Abhängigkeit von GPS und es wurden national oder international Verfahren/Systeme zur Verwen-

dung an Bord vorgeschrieben bzw. vorgeschlagen, die bei ihrer Anwendung **allein** auf GPS-Positionen und/oder -Zeittakten basieren. Das Global Maritime Distress and Safety System (**GMDSS**), Automatic Identification System (**AIS**), Electronic Chart Display and Information System (**ECDIS**) aber auch die Bahnführung sind auf GPS als sogenanntes Stand-Alone-Verfahren angewiesen. Insbesondere auf den Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen wird die Zeit für notwendige Querschecks immer kürzer. Es wurde bereits auf die Gefahr von GPS unterstützten Strandungen, Kollisionen und auch den Verlust von Menschenleben hingewiesen. Sind doch ähnliche Zusammenhänge aus der Vergangenheit bei der Einführung von Radar oder Autopiloten bekannt, spektakulär waren z.B. die radarbedingte Kollision "Stockholm"/"Andrea Doria", und die GPS/Bahnführungsbedingte Strandung "Royal Majestic" und "Silja Europa".

Eine parallele Verwendung verschiedener Satelliten-Systeme (GPS, GALILEO, GLONASS) schränkt die Gefährdung allerdings nur begrenzt ein.

Für die staatlichen Verwaltungen besteht die Verpflichtung, auf Gefahren und Mängel hinzuweisen, die für die ganze Gesellschaft aus einer einseitigen Abhängigkeit großer, kritischer Infrastrukturbereiche von **ungesicherten** Systemen resultieren. Hier sollte auch bedacht werden, daß GPS längst kein reines Navigationssystem mehr ist. Es hängen viele kritische, dezentral zeitgesteuerte Anwendungen von GPS als Zeitbezug ab, wie z.B. **Mobilfunk- und Stromversorgungsnetze, Internet, Börsentransaktionen, digitale Rundfunk- und Fernsehsendungen** aber auch das im Rahmen der Energiewende diskutierte **Smartgrid. Autonom fahrende Autos** wären zusätzlich auch noch über Mobilfunk-Störer gefährdet

Darüber hinaus haben die Verwaltungen dafür zu sorgen, daß sich die Unsicherheiten der benötigten Systeme nicht katastrophal auswirken können.

Die USA reagierte auf die Gefährdung von GPS nach dem 11. Sept. 2001 sehr schnell, am 7. März 2002 lag vom DoT ein Aktionsplan zur Absicherung der auf GPS beruhenden Infrastrukturbereiche vor. Aber auch die Defizite von GPS waren Anlaß einer vom US Verteidigungsministerium vergebenen und im Oktober 2005 veröffentlichten Studie „**The Future of the Global Positioning System**“ des Defence Science Board Task Force. Hingegen zeigen sich die EU ebenso wie die Mitgliedsstaaten weiterhin auf GALILEO fixiert. Auf der European Navigation Conference 08, Toulouse Apr. 2008, hörte man von **Paul Verhoef**, dem **EU-Vertreter für Galileo** (jetzt ESA Direktor Navigation Programme), daß gezielte Störungen der Satelliten-Navigation mittels des jeweiligen Navigationsempfängers zu beseitigen seien. Ein Backup gebe es für die EU grundsätzlich nicht. Es könnten jedoch von den einzelnen Verkehrsbereichen Complementary Systems definiert werden; die größte Uneinigkeit über ein solches System bestünde im maritimen Bereich. **In Deutschland ist es politisch nicht opportun das Thema überhaupt anzusprechen; es ist ja noch nichts passiert.**

GPS-Verfahren mit verschieden großen Fehlern

GPS läßt eine kontinuierliche, dreidimensionale Standort- und Geschwindigkeitsbestimmung zu. Das Verfahren bietet zwei Dienste mit unterschiedlichen Eigenschaften. Der sogenannte Precise Positioning Service (**PPS**), früher P-Code genannt, ist codiert und verschlüsselt (P-, Y-, M-Code). Er steht nur den Streitkräften der USA und ihren Verbündeten zur Verfügung. Der zweite Dienst, Standard Positioning Service (**SPS**), früher C/A-Code genannt, ist einfacher codiert, unverschlüsselt und allen Nutzern zugänglich. Aber auch er wurde ursprünglich nur für militärische Zwecke entwickelt, zur Synchronisation (**Coarse Acquisition**) der Empfänger auf den P-Code.

Seit Oktober 2001, aktualisiert 2008, liegen die GPS-Spezifikationen (SPS) für den Betrieb, nach der am 2. Mai 2000 abgeschaltete Signalverschlechterung (SA), vor. Danach übersteigt im ungestörten Zustand der Positionsfehler in 95% ($PDOP \leq 6$) aller Fälle nicht $\pm 9m$; vorausgesetzt wird dabei, daß alle mehr als 5° über dem Horizont stehenden Satelliten benutzt werden. Damit

ist jetzt auch im zivilen Bereich eine Geschwindigkeitsermittlung möglich. Inzwischen wird auch das zivil genutzte Signal auf Einhaltung der Spezifikationen überwacht.

Die Wahrscheinlichkeitsangabe, daß 95% aller Positionsermittlungen mit einem Fehler von maximal $\pm 9\text{m}$ behaftet sind, bedeutete nicht, daß bei jeweils 100 aufeinander folgenden Messungen nur 5 eine größere Unsicherheit als $\pm 9\text{m}$ aufweisen. Der Wahrscheinlichkeitsangabe liegt jeweils ein Zeitraum von 24 Stunden (Wiederholung der Satellitengeometrie) zugrunde. Theoretisch könnten also für die Dauer von 72 Minuten (5% von 24 h) Fehler über $\pm 9\text{m}$ auftreten. Über den maximalen Fehler werden nur indirekte Angaben gemacht. Er soll gemittelt über 1 Jahr in 99,79% aller Fälle das Sechsfache, d.h. $\pm 54\text{m}$ nicht übersteigen. **Die Verwendung von GPS erfolgt laut USA jedoch auch weiterhin auf eigenes Risiko.**

GPS befindet sich seit längerer Zeit in einem hervorragenden Zustand, z.Zt. sind die maximal möglichen 31 Satelliten aktiv, **garantiert werden von den USA aber augenblicklich weiterhin nur 24**, hierfür gelten auch die SPS-Spezifikationen. Als Folge des augenblicklichen Überangebotes ergeben sich bei der Positionsermittlung sehr viel geringere Fehler (teilweise weit unter $\pm 10\text{m}$) als erwartet und aus den US-Unterlagen zu entnehmen, es sei denn, es liegt eine Abschattung vor, z.B. in Fjorden oder Häuserschluchten.

Die aktiven Satelliten sind unterschiedlich ausgestattet, wie ihrer Zugehörigkeit zu den Blöcken IIR und IIF zu entnehmen ist. So haben die Block IIR-Satelliten (Replacement Satellites 19 davon 7 IIR-M) z.B. eine Konstruktionslebensdauer von 10 Jahren mit einer erwarteten mittleren Betriebsdauer von 7,5 Jahren. Für die IIF-Generation, 12 Satelliten aktiv, sind 12 und 9,9 Jahre Lebensdauer geplant. Aus diesen rechnerischen Lebenserwartungen könnten sich Probleme ergeben, denn es tun inzwischen 18 Satelliten mehr als 9 Jahre Dienst, davon 6 zwischen 9 und 12, 12 über 12 Jahre.

Zur Absicherung laufen aber 6 Reserve-Satelliten um.

Es sind aufgrund der vorstehenden Tatbestände einige Unsicherheiten des Global Positioning Systems unverkennbar. Die Befürchtung des GAO Berichtes, daß ab 2010 nur mit 95% Wahrscheinlichkeit noch 24 Satelliten in Betrieb seien, trat glücklicherweise nicht ein. Hinzu kommen die bisher unbekannt, in der Studie des Defence Science Board aufgezeigten und in der GAO Untersuchung erneut bestätigten, erschreckenden Mängel bei Entscheidungen, Finanzierung und Pflege des Systems. Ähnliche Kommunikations- und Zuständigkeitsmängel bestehen nach GOA offenbar auch zwischen DoT und DHS bei der Redundanz für GPS.

Es darf auch nicht darauf vertraut werden, daß das Militär ja ein funktionsfähiges System benötigt. GPS enthält die Möglichkeit, seine Funktionsfähigkeit durch Verschieben von Satelliten für ein Krisengebiet zu optimieren. Die jetzige 24 Sat.-Konstellation wurde zudem auf eine 24+3 Konstellation optimiert, um in Tälern hohe Positionsgenauigkeit über längere Zeiträume zu erhalten.

Ungewißheiten bei ziviler GPS-Anwendung

Der Tatbestand, daß das GPS-Verfahren vorrangig für die Sicherheitsbelange der USA, d.h. für militärische Zwecke, entwickelt und aufgebaut wurde, darf nie außeracht gelassen werden. Es enthält dementsprechend Möglichkeiten, den Zugang und die Anwendung seitens nicht autorisierter Nutzer, zu denen auch die zivilen Anwender gehören, zu erschweren oder gar zu verhindern. Eine globale Beschränkung, wie sie SA bis Mai 2000 darstellte, ist jedoch nicht mehr zu erwarten. Die Verwendungseinschränkungen werden auf das jeweilige Konflikt- bzw.- Schutzgebiet begrenzen sein. Derartige Veränderungen der Positionsunsicherheit lassen sich nur erkennen, wenn ein mindestens ebenso genaues, unabhängiges Vergleichsverfahren eingesetzt

wird. Auch ein parallel genutztes anderes Sat.-System könnte Sicherheit bringen, sofern es nicht auch manipuliert ist.

GPS Modernisierung

Bereits 1995 begannen Bemühungen, das militärische Potential von GPS zu erhöhen, der **Systementwurf** war schließlich inzwischen **über 20 Jahre alt**.

Das Ende einer längeren Diskussion war am 28. März 1996 die Richtlinie des US Präsidenten (Presidential Decision Directive, PDD) für die zukünftige Handhabung und Nutzung von GPS und seiner von den US-Verwaltungen bereitgestellten Ergänzungen. Sie wurde am 15. Dezember 2004 durch eine neue Richtlinie (NSPD-39) zur Politik der satellitengestützten Einrichtungen zur Verwendung von Position und Zeit (PNT) ersetzt. Die Dreiteilung politische Ziele, politische Richtlinie, Verantwortung der Ministerien blieb, es wurde aber eine Verstärkung der Sicherheitsgesichtspunkte und eine Verschärfung der Richtlinien für den Export sensibler Techniken vorgenommen:

- 1) **GPS-SPS** wird weiterhin kostenlos, kontinuierlich, weltweit für friedliche **Verwendung auf eigenes Risiko** zur Verfügung gestellt.
- 2) GPS und die staatlicherseits vorgenommenen Ergänzungen (DGPS, LAAS, WAAS) bleiben in der Entscheidungsverantwortung der National Command Authorities (Präsident, Verteidigungsminister, Oberster Stabschef).
- 3) Fremden Systeme und Ergänzungen sind in ihren möglichen Wirkungen auf die Sicherheit der USA zu analysieren.
- 4) Die Verantwortung für GPS und die Ergänzungssysteme wird aufgeteilt auf die Ministerien für:
 - Verteidigung: Entwicklung (auch Zusatzlasten für globale SAR-Zwecke und Backup-Systeme), Betrieb von GPS, Fragen der mil. Nutzung,
 - Verkehr: Fragen der zivilen Nutzung, Entwicklung und Betrieb von Ergänzungs- und Redundanz-Systemen für zivile Infrastruktur, Redundanz
 - Handel: Fragen der Frequenz-Sicherung und -Beschaffung,
 - Äußeres: Verbreitung von GPS als internationales Standard-Navigationverfahren zur Vermeidung von Gefahren für die US Wirtschaft,
 - Nationale Sicherheit: Fragen der Nutzung für Innere Sicherheit, Abwehr gefährlicher Nutzungen und Störungen im Inland, Koordination von Redundanz-Systemen.

Am 1. Mai 2000 wurde das vorzeitige Abschalten von SA in einer Pressekonferenz des Weißen Hauses veröffentlicht. Dort wurde auf Befragen aber bestätigt, daß **DGPS weiterhin notwendig** sei.

Mit dem Abschalten von SA verminderte sich zwar der Positionsfehler auf ca. 10% des bisherigen, an den fundamentalen Einschränkungen von GPS änderte sich jedoch nichts. Für **sicherheitskritische** Anwendungen, bei denen unentdeckte Systemfehler sofort zu schwersten Risiken führen, ist GPS ohne Redundanz weiterhin nur bedingt geeignet (z.B. Durchsteuern Katerinne, auch die Empfehlung des BMVBW, hierbei zugelassene ECDIS-Anlagen, sie nutzen GPS-Positionen, einzusetzen, verbessert die Situation nicht). Die im Auftrag einer US Presidential Decision Directive erstellte VOLPE-Studie (10. Sept. 01 veröffentl.) über die Verwundbarkeit der auf GPS beruhenden nationalen Verkehrsinfrastruktur fordert für alle sicherheitskritische Anwendungen die Entwicklung und Einführung geeigneter GPS-Stütz- bzw. GPS-Redundanz-Systeme.

Die **Weiterentwicklung** des **Precise Positioning Service**, PPS, verteilt sich etwa gleich auf Steigerung der Leistungsfähigkeit und Erhöhung der Störfestigkeit.

Die Satelliten-Software wurde geändert, es wurden bislang freie Plätze des Datentelegramms der Satelliten belegt.

Auch die Anzahl der anfangs 5 GPS-Monitorstationen wurde erhöht. Stationen der **National Imagery and Mapping Agency** erhielten GPS-Monitorausstattung. NIMA vormals Defence Mapping Agency (DMA) erhielt als Folge des 11. Sept. zusätzliche Aufgaben und einen neuen Namen „**National Geospatial-Intelligence Agency**“ (NGA) und wurde vom Departm. of Defence ins Departm. of Homeland eingegliedert. Der NGA untersteht auch die Master-Station des im Aufbau befindlichen **GPS Jamming Location System** (JLOC). Die dort gesammelten, aktuellen Daten über GPS-Störungen, sollen in der Master Station auf aktuelle Einflüsse für die militärischen und zivilen Verwendungsbereiche von GPS analysiert und notwendige Abwehrmaßnahmen veranlaßt werden. Auch ein DHS-Programm „Patriot Watch Interference Detection and Mitigation“ (IDA) dient diesem Zweck. Vergleichbar ist das UK-System „GAARDIAN“ der Firma Chronos Techn. Mit den jetzt 16 GPS-Monitorstationen lassen sich die 31 Satelliten zeitgleich von 2 Stationen beobachten. Es lassen sich so laufend Bahn-, Zeit- und Gesundheitsdaten der Satelliten ermitteln und damit die Navigation Message der Master Control Station (MCS) für jeden einzelnen Satelliten schneller aktualisieren. Jeder Satellit hat jetzt außerdem die Bahndatenkorrekturen für alle anderen. Lediglich nach dem Satelliten mit der jüngsten Aufdatierung muß gesucht werden, um für alle Satelliten die aktuellsten Korrekturen zu erhalten. Um den Suchvorgang zu beschleunigen, wurde die Kanalzahl bei den mil. Anlagen erhöht. Mit dieser Maßnahme verbleibt bei ihnen ein Positionsfehler in der Größenordnung von schätzungsweise $\pm 1..1,5\text{m}$ (SEP). Eine zweite MCS wurde in Gaithersbury, Maryland fertig gestellt und übernahm im Oktober 2007 die Kontrolle und den Betrieb der GPS-Satelliten. Mit einer Software-Anpassung OCX (Next Generation Operational Control System) an GPS III, soll auch die Zahl maximal zu betreuender Satelliten von jetzt 32 auf 63 erhöht werden. Der wesentliche Gewinn betrifft die militärische Anwendung. Die volle OCX-Betriebsbereitschaft soll 2020 vorliegen.

Mit OCX und der gestiegenen Zahl der Monitorstationen dürfte sich auch für zivile Anwender die Warnzeit bei Satelliten-Störungen verkürzen. Zivile Anwender sollten aus Sicherheitsgründen aber weiterhin damit rechnen, erst 2h (GLONASS $\geq 6\text{h}$) nach Auftreten eines Satellitenfehlers darüber sicher informiert zu sein. So trat beim GPS-Satelliten PRN 22 am 22. Juli 2001 ein empfängerseitig nicht erkennbarer Uhrenfehler auf. Er wurde zwar von der WAAS-Kontrollstation sofort erkannt, aber für die GPS Master Control Station stand der Satellit für Kontrollmessungen und notwendige Steuerungsmaßnahmen schon zu tief. Erst nach 111 Minuten konnte der Satellit als fehlerhaft markiert werden. Während der knapp 2 Stunden erzeugte er örtlich bis zu 300 km Positionsfehler. Daß eine derartige Störung kein Einzelfall ist, zeigte sich am 1. Jan. 2004. Bei dem Satelliten PRN 23 trat um 18:33 Uhr (UTC) ebenfalls ein Uhrenfehler auf. Die von Sportbootanlagen nur bedingt erkennbare Störung endete um ca. 22 Uhr, als die Bodenkontrolle wieder Zugriff auf den Satelliten hatte und ihn als unbrauchbar markieren konnte. Messungen in Kiel ergaben in 95% aller Fälle einen Positionsfehler von $\pm 4,6\text{sm}$. In den restlichen 5% erreichte der Fehler bis zu 22sm. Dieser Uhrenfehler hatte nach offizieller Mitteilung der USA Auswirkungen auf die Nutzer in großen Teilen Europas, Afrika, Asien, Australien und dem äußersten Norden Nordamerikas.

Derartige, schwer bis nicht erkennbare Störungen können sich jederzeit wiederholen; lediglich ihre Dauer wird abnehmen. Hier kann begrenzt ein parallel genutztes Sat.-System Sicherheit erzeugen, zumindest aber Unstimmigkeit erkennen lassen.

Die Entscheidung der IGEB für die **Modernisierung** des **Standard Positioning Service**, SPS, fiel bereits am 27. März 1998. Inzwischen wurde ein zweites Signal (L2C) auf der GPS-Frequenz L2/1227,60MHz eingefügt und teilweise das dritte Signal L5, 1176,45MHz. Diese Signale sind für Nutzer mit höchsten Genauigkeitsansprüchen gedacht. Für die normale Navigation werden sie keine Rolle spielen.

Das DoD ist an zusätzlichen, zivilen Signalen nicht interessiert, es arbeitet im Gegenteil daran, sich von der Synchronisation über den C/A Code freizumachen. Es benötigt seine Haushaltsmittel für die Sicherung der Störfestigkeit. Im Bereich DoT ist die FAA zuständig.

Dem DoD wurde auch der spezielle Haushaltstitel "GPS" gestrichen. GPS-Aufwendungen müssen aus einem Gemeinschaftstitel, der alle mil. Weltraumaktivitäten enthält, bezahlt werden. Hinzu kommen unklare Zuständigkeiten bei den Entscheidungen.

Z. Zt. werden die GPS III-Satelliten geplant (1. im Testverfahren). Sie haben keine SA-Befähigung werden aber mit 4. zivilem Signal (L1C) ausgestattet. Sie werden das System robuster gegen Störungen machen. Der erste Start soll 2018 erfolgen und 2026 sollen 24 Satelliten in Betrieb sein. Das Einhalten des Zeitplanes ist wegen ständiger U.S. Haushaltsstreitigkeiten fraglich. Wegen der OCX-Verzögerungen werden 8 von 10 GPS III-Satelliten im Umlauf sein, bevor Test ihre vollen Funktionsfähigkeit (M-Code-Nutzung) bestätigen können. Zudem wird über Alternativen diskutiert, z.B. Satelliten-Fähigkeiten zu vermindern bzw. auf Nichtnavigations-Satelliten auszulagern. **Mit der GPS III-Generation muß GALILEO sich messen, nicht mit dem jetzigen Zustand.**

Die zukünftigen GPS-Satelliten sollen, ähnlich wie die GALILEO-Satelliten mit einer Payload für Cospas-Sarsat ausgestattet werden. Dieser Transponder soll das Seenotsignal von 406 MHz in das Distress & Safety-Band L6 (1544-1546 MHz) umsetzen. Hiermit will man die untragbaren Alarmierungszeiten von 70 Minuten und mehr wesentlich vermindern. Seit 2003 fliegen bereits einige IIR-Satelliten mit diesen sogenannten „Proof of Concept“ (POC) Transpondern. Z.Zt. besteht allerdings die Gefahr, daß diese zusätzliche Payload Einsparungen zum Opfer fällt.

GLONASS eine Alternative?

GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) stellt das von der ehemaligen UdSSR entwickelte, ebenfalls vom Militär betriebene Gegenstück zu GPS dar. Auch bei ihm wird mit zwei Frequenzen und Signalen gearbeitet, wobei wiederum ein Signal dem Militär vorbehalten ist. Allerdings kannte GLONASS zu keiner Zeit eine Verschlechterung (SA vergleichbar) des zivil nutzbaren Signals. Es war von Anbeginn nur mit einem Fehler ca. $\pm 30\text{m}$ behaftet, und es konnte daher auch zur Geschwindigkeitsbestimmung mit herangezogen werden. 24 Satelliten bilden das vollständige System. Sie waren erstmals am 18. Januar 1996 in Betrieb; es erfolgte die Erklärung der vollen Betriebsbereitschaft (FOC). Das System wurde aber in der Folgezeit nicht sehr gut gepflegt, die Zahl von 24 Satelliten konnte nur kurzfristig aufrechterhalten werden.

Zudem wurden nicht alle Systemmängel offengelegt, dies gilt auch heute noch. Bereits nach einem halben Jahr waren nicht mehr 24 Satelliten betriebsbereit, womit letztlich FOC nicht mehr vorlag. Inzwischen wurde GLONASS revitalisiert, am 22.12.2011 wurde erneut FOC erklärt. Es sind wieder 24 (1 Test) Satelliten in Betrieb (letzter erfolgreicher Start 29.05.16, Glonass-Sat. 136). Die neuen M-Satelliten sollen u.a. eine längere Lebensdauer (7 Jahre) aufweisen. Für sicherheitsrelevante Anwendungen ist die Verwendung von GLONASS allein wohl noch nicht zu verantworten. Am 01.04.2014 brach **GLONASS** infolge eines Software-Fehlers in den Satelliten total zusammen. Es war **von 01.04.14, 21:15 UTC bis 02.04 14, 07:30 UTC. nicht verwendbar**. Diese lange Ausfallzeit wurde benötigt, um den Software-Fehler zu finden. Der Hintergrund war ein fehlerhaftes Update übertragen an einen Satelliten, von dem es systembe-

dingt dann an alle GLONASS-Satelliten weiterverteilt wurde. Ähnliches Verfahren wird auch bei GPS angewandt.

Inzwischen gibt es ein russisches Gesetz, das es verbietet im Lande Navigationsgeräte zu nutzen, die kein GLONASS umfassen, ob es auch für Mobilfunkgeräte mit GPS gilt ist unbekannt. Einige kombinierte GPS/GLONASS-Anlagen fielen anlässlich des GLONASS-Totalausfalls jedoch ebenfalls aus. 2016 wurde über GPS-Ausfall im Bereich des Kremls berichtet. Untersuchungen ergaben, daß sich die Störquelle im Kreml befand (Jamming, Absicherung Drohnen?)

Zusammen mit den USA arbeitete eine Arbeitsgruppe daran die Interoperabilität und Kompatibilität von GPS und GLONASS herzustellen. Inzwischen wurde eine neue Fassung (Vers.5.1, 2008) des „GLONASS Interface Control Document“ (Beschreibung der Signale und ihrer Ausbreitungseinflüsse) veröffentlicht.

Am 30. Nov. 2014 wurde der zweite Satellit der neuen K-Generation (Auftrag über 22 Satelliten) gestartet und am 15. Feb. 2016 als erster aktiv geschaltet. Mit ihm erfolgt der GLONASS-System-Umbau, es wird Code Division Multiple Access (CDMA) wie bei GPS (die gleichen Frequenzen für alle Satelliten) eingeführt. Bisher unterscheiden sich die GLONASS-Satelliten untereinander durch ihre unterschiedlichen Frequenzen und nicht durch einen zugeordneten Code (PRN) wie bei GPS.

Auswirkungen auf andere Navigationssysteme

Die Betriebsaufnahme von NAVSTAR-GPS blieb nicht ohne Einfluß auf die bisherigen Verfahren.

Es wurden abgeschaltet:

| | | |
|-------------------------|-----------------------|---------------|
| TRANSIT/NNSS | am 31. Dezember 1996 | (Alter 32 J.) |
| DECCA (Norwegen) | am 28. Februar 1997 | (Alter 32 J.) |
| OMEGA | am 30. September 1997 | |
| DECCA (Festland) | am 31. Dezember 1999 | |
| DECCA (Engl.,Irl) | am 31. März 2000 | (Alter 55 J.) |
| LORAN-C (USA) | am 08. Februar 2010 | |
| LORAN-C (eLORAN) Europa | am 31. Dezember 2015 | |

LORAN-C hat als separates Nav.-System (Hyperbelnavigation) keine Bedeutung mehr. Als modifiziertes Low Frequency System oder **ENHANCED LORAN (eLORAN)** bietet es jedoch eine notwendige, anerkannte Absicherung (Redundanz) zur Satelliten-Navigation. Auch als „Zeitnormal“ ohne navigatorische Verwendung könnte es bei Sat-Nav.-Anlagen einer erweiterten Fehlererkennung (Jamming, eventuell Spoofing) dienen. Im Gegensatz zu den USA hat Europa sich jedoch vorerst von eLORAN verabschiedet.

Die terrestrischen Navigationshilfen, wie Tonnen und Leuchtfeuer, wurden und werden teilweise aber auch erheblich vermindert.

Unabhängigkeit von GPS

Für die EU war es nicht zu akzeptieren, daß zukünftig alle europäischen, kritischen Transportaktivitäten und zeitkritische Systeme, wie z.B. Mobilfunk, Stromversorgung allein von GPS abhängig wären. Man entschied sich für ein europäisches System, GALILEO.

Die Verhandlungen über eine 20 Jahre währende Betreiberkonzession für ein privates Firmen-

konsortiums zogen sich hin, bis sie 2007 endgültig scheiterten. Den geäußerten Befürchtungen, daß Indien (Ideen, Software) und China (Hardware) die großen Gewinner von Galileo sein könnten, trat die EU-Kommission mit der Veröffentlichung (08. Dez. 2006) eines Grünbuches entgegen.

Am 30. Okt. 2000 startete **China** für Testzwecke seinen ersten Navigations-Satelliten. Es soll ein GPS ähnliches System aufgebaut werden, vorrangig für Landnavigation (Straße, Schiene).

Indien baute ebenfalls ein regionales Sat.-Nav. System (**Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS**) auf. Der erste Satellit IRNSS-1A wurde am 1. Juli 2013 gestartet.

GALILEO

Das System soll zu GPS kompatibel sein und es wird wie dieses aus Steuermitteln finanziert. Die **Public Private Partnership, PPP** war eine Illusion.

Vorgesehen sind für das System 24 plus 6 Reservesatelliten auf 3 Bahnen in 23.616km Höhe. Die Bahnen besitzen eine Neigung gegen den Äquator von 56° (GPS: 55°, ursprüngl. Planung 65° und 8 Sat auf 3 Bahnen). Sie werden jeweils mit 10 Satelliten besetzt. Die Umlaufzeit beträgt 14h (GPS: 12h). Die Anfangskonstellation wird 18 Satelliten umfassen, 14 bei OHB bestellte, 1. Start 2012 und letzte Lieferung 2014 **sowie** 4 Erprobungssatelliten (**Inorbit Vallidation Satellites (IOV)**, Start 21.10.2011 2 Sat. (ausgelegt für OS, PRS), 12. Okt. 2012 die anderen 2 Satelliten). Der erste Fix wurde von der ESA in Noordwijk am 12.03.13 mit einem Fehler von 10...15m ermittelt. Gleiche Ergebnisse erzielte man auch in Österreich. Die bisherigen Starts von jeweils 2 Satelliten mit russischen Raketen wurden am 17. Nov. 2016 durch einen Ariane-Start mit 4 Satelliten abgelöst. Am 15. Dez. 2016 erfolgte die Erklärung des Teilbetriebes (IOC, mit Open Service, SAR-Dienst und Public Regulated Service) mit 11 betriebsklaren Satelliten, inzwischen 18. Am 12. Dez. 2017 wurden weitere 4 Satelliten (19, 20, 21, 22) gestartet und Mitte 2018 sollen weiter 4 folgen (23, 24, 25, 26). Mit 24 Satelliten wäre dann die 100% Abdeckung erreicht. 2020 soll die volle Betriebsbereitschaft (FOC) zu erklären sein.

Seit 2014 läuft die Planung der II. GALILEO-Generation und 2019 sollen die Anforderungen definiert sein.

Das Meßprinzip bei GALILEO entspricht dem von GPS, es werden die Entfernungen zu den sichtbaren Satelliten gemessen (Ranging Codes). Es sind drei GALILEO-Kontrollzentren (De., Ital., Span.) vorgesehen. Zusätzlich wird es noch örtliche Zentren geben, die befugt sein werden, ermittelte Integritätsinformationen zu den Satelliten zu übertragen. So soll sichergestellt werden, daß im fertigen System immer von mindestens 2 Satelliten, höher als 25° über dem Horizont stehend, aktuelle Integritätsinformationen zu empfangen sind.

Wie bei GPS arbeiten alle Satelliten auf den gleichen Frequenzen, die Unterscheidung erfolgt auch hier anhand des für jeden Satelliten spezifischen Codes. Einzelheiten enthält auch hierzu das Interface Control Dokument (OS SIS ICD 1.2).

Von GALILEO sollen folgende Dienste angeboten werden:

SAR-Dienst (15. Dez. 2016) Er soll es erstmals zulassen, daß der Alarmauslösende eine Bestätigung seines Alarms erhält.

Auf Druck Frankreichs wurde das unsichere Cospas-Sarsat vorgesehen. Die deutsche Entwicklung der Signalstruktur der INMARSAT-Seenotboje einschließlich der Erdefunkstelle in Perth, Australien, wurde mit erheblichen deutschen Steuermitteln unterstützt aber nicht intensiv vertreten. Inmarsat schaltete das Seenotsystem 2006 ab.

Open Service (OS) (15. Dez. 2016) Er kann von jedermann kostenlos genutzt werden. Dieser Dienst ist vergleichbar mit dem zukünftigen, modernisierten GPS mit einem dritten Signal L5 für zivile Anwender (Block IIF und Block III Satelliten). GALILEO wird nicht genauer sein als

das zukünftige GPS III.

Commercial Service (CS) (erste Tests 2015, Bereitstellung mit FOC 2020 erwartet) Bei ihm erfolgt der Zugang über einen Service Provider (soll 2018/19 bestimmt werden), d.h. es ist eine Anmeldung Voraussetzung. Als Gegenleistung stehen ein freies und ein verschlüsseltes Signal mit Ranging Code und Daten auf einer weiteren Trägerfrequenz (E6/1278,75MHz) zur Verfügung. Eine klare Aussage zur System-Garantie gibt es noch nicht.

Safety of Life Service (SoL) (erste Tests 2015, Verzögerung wegen Problemen mit chinesischen Sat.-Signalen) Er ist ebenfalls kostenpflichtig. Er benutzt 4 Signale und erhält Zugriff auf die Integritätsinformationen. Dieser zertifizierte Dienst soll mit zertifizierten Zweifrequenz-Anlagen arbeiten. Integrität wird sich kostenlos mathematisch (Anlagen-Software) aber auch aus den dann verfügbaren mindestens 60 Satelliten (GPS, GALILEO, GLONASS) ermitteln lassen.

Public Regulated Service (PRS) (15. Dez. 2016) Er arbeitet mit 2 verschlüsselten Signalen auf zwei verschiedenen Frequenzen (E6, E2-L1-E1). Dieser Dienst ist hinsichtlich Zugang und Anwendung bedingt vergleichbar mit dem jetzigen verschlüsselten, militärischen Anteil bei GPS (PPS mit P-, Y- und M-Code). PRS ist zukünftig auch für zivile Anwendungen vorgesehen, bislang war der Hauptinteressent das französische Militär. Den zivilen Nutzerkreis dürfen die einzelnen Staaten bestimmen, Unklarheit besteht hierbei jedoch hinsichtlich einer grenzüberschreitenden Nutzung.

Offenbar sind inoffiziell inzwischen auch staatliche, zivile Organisationen der USA an einer Nutzung interessiert. Dies erfordert jedoch von der FCC eine Freigabe, wie sie für alle Nicht-GPS-Verwendungen erforderlich ist. Von der EU wurde 2012 für GALILEO ein entsprechender Antrag gestellt. Er wird befürwortet sowohl vom National Telecomm. and Information Admin. (NTIA) als auch vom DoD (Sicherheit Sat.-Nav.). Widerstand kommt weithin von Ligado, Nachfolger LightSquared, die angrenzende Frequenzbereiche (Satelliten-Frequenzen) für leistungsstarke Mobilfunk-Sender nutzen wollen. Wegen der nachgewiesenen Störungen der GPS-Verwendung wird hoffentlich eine Nutzungssperre der Frequenzen für terrestrische Sender erlassen.

PRS war die Ursache einer Verstimmung zwischen der EU und den USA. Bereits 2014 fragte die USA auch nach möglicher Nutzung von PRS. Der Mißbrauch der Satelliten-Navigationssysteme kann eine Bedrohung der nationalen Sicherheit bedeuten. Eine typische Maßnahme dagegen ist das Vorhalten von Möglichkeit, um in Krisensituationen die als gefährlich angesehenen Signale (primär die offenen, zivil genutzten Signale) zu beeinflussen.

Im Rahmen der Modernisierung von GPS führt die USA ein neues, verschlüsseltes militärisches Signal (M-Code) ein. Hierfür ist aber, wie für den Public Regulated Service, das Signalband E2-L1-E1 vorgesehen. Die USA könnten im Krisenfall zum eigenen Schutz zwar örtlich die zivil genutzten Teile des Bandes stören, den für sie dann ebenfalls gefährlichen PRS-Teil von GALILEO könnten sie hingegen unter Gewährleistung der Sicherheit des eigenen M-Code nicht stören.

Am 26. Juni 2004 (Dublin) kamen USA und EU dann u.a. überein, daß

--- PRS und M-Code getrennt werden,

--- zukünftig die zivil genutzten Signale von GPS und GALILEO eine einheitliche Signalstruktur erhalten,

--- die unterschiedlichen geodätischen Bezüge und die Zeitsysteme interoperabel sein sollen.

Für die optimale Signaltrennung GPS / GALILEO wurden spezielle Modulationsverfahren entwickelt. Dafür ließen sich zwei britische Mitarbeiter (beide Mitglieder der Galileo Signal Task Force) einer im Auftrag des UK Verteidigungsministeriums arbeitenden Firma offenbar wenig präzise formulierte Patente erteilen. Als eine britische Inkassofirma Ploughshare Innovations Anlagen- und Satellitenhersteller wegen Lizenzgebühren kontaktierte, gab es Patentstreitigkeiten ähnlich wie bei Apple und Samsung. Am 1. Okt. 2012 endete der Spuk mit dem Verzicht der Patentinhaber, zumindest gegenüber GPS aber nicht bei GALILEO. UK versucht hier offenbar

wieder einen finanziellen „Kuhhandel“ mit der EU.

Sicherheitsbedenken der USA schienen ausgeräumt und die Voraussetzungen für ein echtes Kombinationssystem GPS/GALILEO geschaffen. Die EU sieht für GALILEO als rein zivilem System im Konfliktfall allerdings keine Signalveränderung oder –abschaltung zur Nutzungseinschränkung vor. Dies soll selbst dann gelten, wenn GALILEO in einem Krieg gegen die USA genutzt werden sollte. Die USA wollen in solchem Fall, insbesondere wenn China am Konflikt beteiligt sein sollte, GALILEO nicht nur reversibel stören sondern auch irreversibel (Zerstörung der Satelliten).

Aus dem DoD wurden darüber hinaus aber auch Befürchtungen laut, daß GPS ein sehr kostspieliges, nur noch militärisch genutztes System werden könnte, wenn GALILEO in Betrieb sei und die GPS-Mängel nicht beseitigt würden. Inzwischen möchte man GALILEO parallel nutzen, um Spoofing zu erkennen.

Das GALILEO-Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen hat mit der IOC-Erklärung den Betrieb des Systems übernommen.

Um GALILEO benutzen zu können, bedarf es selbstverständlich neuer Navigationsanlagen. Für den Sportbootbereich genügt eine Einfrequenzanlage, die lediglich die offenen Signale von GPS und GALILEO auf dem Band E2-L1-E1 verarbeiten kann und möglichst geeignet sein sollte, mangelbehaftete Signale zu ignorieren (Integrität). Im kommerziellen Bereich gibt es bereits Vielkanalanlagen, die GPS, GALILEO, GLONASS und BeiDou abdecken. Mehrfrequenzanlagen ergeben einen Gewinn an Integrität aber auch bessere Positionsgenauigkeiten, (3 Frequenzanl. etwa Genauigkeiten von $\pm 1\text{m}$) die aber von keiner Seekarte unterstützt werden. Schon die mit heutigen GPS-Anlagen erreichten Genauigkeiten lassen sich in der Seekarte kaum noch nutzen.

Für die Entwicklung und Erprobung von GALILEO-Anlagen wurde bei Berchtesgaden ein Testfeld (GATE) eingerichtet. Es werden simulierte GALILEO-Signale von Sendern auf 6 angrenzenden Bergen ausgestrahlt.

BeiDou (ex COMPASS)

Das geplante chinesische **BeiDou Navigation Satellite System (BDS)** soll 5 geostationäre (GEO) und 30 (Non GEO) Satelliten umfassen. Die Abdeckung Chinas, wurde 2011 erreicht, nutzbar sind 5 GEO (140°E, /110,5°E /160°E /58,75°E /80,3°E), 8 ISGO (stark elliptische GEO-Bahn, 3 auf 118°E, 55°Incl / 5 auf 95°E, 55°Incl) und 8 (+1 Testbetrieb) MEO (Umlaufbahn 27.900 km). Mit der Veröffentlichung der Schlüsselinformationen (Performance Standard and Signal In Space Interface Control Document, SIS ICD) für den Open Service am 26. Dez. 2012, ergänzt und aktualisiert im Nov. 2016, ist dieser öffentlich nutzbar (Abdeckung Asien-Pazifik-Region). Für 2020 ist die volle, weltweite Betriebsbereitschaft vorgesehen.

Es sollen zehn Dienste angeboten werden, fünf kommerzielle und fünf abgesicherte. Der offene Service soll einen 95%-Fehler von $\pm 10\text{m}$ bei der Position und $\pm 0,720\text{km/h}$ bei der Geschwindigkeitsermittlung aufweisen.

China ist bereit mit anderen Staaten beim Aufbau des Systems zu kooperieren. Nach den bisherigen Kenntnissen werden die Frequenzbänder E1, E2, E5B, E6 genutzt. BeiDou ist mit GALILEO nicht kompatibel. Zwischen der EU und China bestanden erhebliche Dissonanzen. Sie wirkten sich bis zur European Navigation Conference, 2010 (ENC/GNSS, Braunschweig Okt.2010, ca. 300 Teiln. aus 28 Nationen) aus. Dort konnten im Programm gelistete Galileo-Vorträge wegen zurückgezogener Vortragserlaubnis (DLR, ESA) nicht gehalten werden. Auf der ENC/GNSS April 2013 waren Beschränkungen nicht mehr erkennbar.

Inzwischen finden wieder Gespräche zwischen China und der EU zur Lösung der Signal-

Konflikte statt, die offenbar erste Erfolge zeigen. Laut Plan III will China das offene Signal auf die GPS-Frequenz 1575,42MHz verschieben und gleichzeitig die Modulation der von GPS (L1C) und GALILEO (L1) anpassen (Kompatibilität).

NAVIC (Navigation with Indian Constellation, ex **IRNSS**, Indian Regional Navigation Satellite Service)

Das NAVIC-System ist in Betrieb und besteht aus 3 GEO-Satelliten (83°E, 32,5°E, 129,5°E) und 2 Paar IGSO-Satelliten (55°E, 29°Incli, 111,75°E, 29°Incli). Am 31.Aug. 2017 erlitt ein Ersatzsatellit einen Fehlstart. NAVIC verwendet allerdings neben L5 (1176,45 MHz) eine abweichende Arbeitsfrequenz 2492,028 MHz, Es werden 2 Dienste angeboten SPS, Standard Pos. Service, allgemein zugänglich mit ± 10 m und RS, Restricted Service, encrypted, mit $\pm 0,1$ m.

Absicherung der Satelliten-Navigation

GPS ebenso wie das zukünftige GALILEO wird in seiner Funktionsfähigkeit durch **unabsichtliche** (wie z.B.: unerkannte Satelliten-Signalmängel, Ausbreitungsanomalien z.B. durch Sonnenaktivität, Reflexionen und Abschattungen, Gefahr droht auch von Ultra-Wideband-Networks) aber auch **absichtliche Störungen** vermindert (Jamming) oder sogar verfälscht (Spoofing). Eine gegenseitige Absicherung der verschiedenen Sat.-Nav.-Systeme ist nur in einigen Fällen möglich.

Die Uni Texas hat mittels verfälschter GPS-Signale eine 0,6km entfernte, zivile Drohne zur vorzeitigen Landung gezwungen, aber auch ein Schiff unbemerkt vom Brückenpersonal auf einen mehrere 100m versetzten Parallelkurs gebracht. Ein zusätzliches Störproblem hatten sich die USA mit einer vorläufigen FCC-Genehmigung eines Mobilfunk-Netzes für **LightSquared** eingehandelt. Es wurde das für mobile Satellitenfunk-Dienste reservierte Frequenzband, direkt angrenzend an das Sat.-Nav.-Band, für terrestrische Nutzung (LTE) geöffnet. LightSquared beabsichtigte dafür ca. 40.000 Basisstationen mit bis zu 15 kW Sendeleistung zu errichten. Im Abstand bis zu 100km wäre dann je nach GPS-Anlage mit erheblichen Verwendungseinschränkungen zu rechnen gewesen. **LightSquared** ist inzwischen insolvent, hat aber bereits einen Nachfolger **LIGADO**. Auf der ENC 2011, London, wurden bereits Befürchtungen geäußert, dass auch Europa ähnliches drohen könnte; Mobilfunk bringt Steuereinnahmen, Sat.-Nav. hingegen kostet. Am 31. Dez. 2011 unterzeichnete der US Präsident ein Gesetz, dass es dem FCC verbietet Dienste zu erlauben, die in irgendeiner Art die militärische Nutzung von GPS beeinflussen. Es wird überall an Methoden gearbeitet, mit denen sich absichtliche Störungen eliminieren aber mindestens erkennen lassen, gedacht wird u.a. auch an ein zertifiziertes GPS-Signal und Minimalanforderungen für zivile Anlagen

Unerwartet starke Sonnenaktivität am 6. Dez. 2006 führte z.B. über ca. 30 Minuten zum totalen GPS-Ausfall und am 24. Sept. 2011 örtlich zu zehnminütiger Störung 8 Minuten nach Sonnenaktivität (Burst) jeweils im Bereich der sonnenseitigen Erde. Erinnerung sei auch an den Sonnensturm vom 23. Mai 1967, der zu einem stundenlangen Ausfall sämtlicher Radarfrühwarnstationen und des gesamten Funkverkehrs in nördlichen Breiten führte. Während des auslaufenden Maximums der Sonnenaktivität wurden keine nennenswerten Störungen bekannt. Bisher sind verlässliche Vorhersagen eventueller Beeinflussungen weder zeitlich noch örtlich möglich außerdem besteht eine Anlagenabhängigkeit. Vom Cabinet Office, UK, wurde 2015 eine Neufassung der Space Weather Preparedness Strategy (Vs 2.1) veröffentlicht. Sie beschreibt Maßnahmen um Infrastrukturauswirkungen möglichst gering zu halten.

Ein überraschender Effekt trat beim Abschalten des GPS-Satelliten SVN 23 (PRN 32) am 26. Jan. 2016 auf. Eine dabei benutzte fehlerhafte Software erzeugte bei 15 Satelliten einen Zeitfeh-

ler von 13 ms. Betroffen war davon u.a. der Empfang des Digitalradios der BBC, aber auch zahlreiche globale stationäre und mobile **Zeitsignalnutzer** meldeten in den folgenden 2 Tagen Störungen. Die Positionsbestimmung war nicht beeinträchtigt.

In die Kategorie absichtlicher Beeinflussungen fallen neben Manipulationen im Konfliktfall aber auch Störungen durch Terroristen, Hacker oder andere kriminelle Handlungen. Eine umfassende Verwendung eines, nicht auf GNSS beruhenden, Redundanz-Systems könnte den augenblicklich steigenden Störanreiz vermindern. Die Störtechniken sind bekannt, entsprechende Einrichtungen auf dem Markt (schon 1997 wurde für \$3.500 auf der Moskauer Luftfahrtschau ein GPS-Störsender angeboten, einfache Störer sind inzwischen im Internet für \$25 zu erhalten). Sie sind aber auch leicht zu bauen, Anleitungen bietet das Internet. Bauteile für ca. \$1000 genügen für eine Störreichweite von ca. 50 km. Damit ließe sich die GNSS-Nutzung über die Breite vieler Meeresengen, beispielsweise des englischen Kanals oder der Elbmündung, zum Erliegen bringen. D.h. es müßte mit plötzlichem Ausfall oder weit schlimmer mit Verfälschung der GPS, GALILEO oder GLONASS Position, verbunden mit entsprechenden Auswirkungen auf Elektronischen Seekarte (ECDIS), Automatic Identification System (AIS), Bahnführungsanlagen und Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS) auf dem eigenen und allen benachbarten Schiffen gerechnet werden. Nordkorea stört beispielweise mit hoher Leistung seit Aug. 2010 in Häufigkeit und Dauer zunehmend die GPS-Verwendung in Südkorea und den angrenzenden Seegebieten. Es sind alle drei Signale L1, L2, L5 gleichermaßen betroffen. Aber selbst geringe Störleistungen können nachgewiesenermaßen an Bord zu erheblichen, nicht alarmbelegten Positionsfehlern führen, mit entsprechenden Auswirkungen auf angeschlossene Systeme.

Ein typisches Störbeispiel war die Verwendung eines Störsenders in einem LkW um die Ortung seitens des Arbeitgebers zu verhindern. Das Fahrzeug befuhr eine Straße neben einem Flughafen und störte die dortige GPS-gestützte Landeeinrichtung.

Die zwar kostenintensivere Erzeugung eines GPS oder GALILEO ähnlichen Signals (Spoofing), d.h. die Vortäuschung einer beliebig zu variierender falschen Position, würde die Störreichweite bei gleicher Leistung noch um etwa den Faktor 10 erhöhen.

So wurde beispielsweise am 22. Juni 2017 an der russischen Schwarzküste das GPS-Signal derartig manipuliert, daß auf mehr als 20 Schiffen fehlerhafte Positionen von bis zu 25sm angezeigt wurden(Landpositionen). Auswertungen der dokumentierten Anlagen-Anzeigen ergab, daß lediglich Positionsfehler von $\pm 100\text{m}$ vorlägen bei einem HDOP 0,8. Alle Schiffe befanden sich aber laut Anzeige annähernd auf dergleichen Position nahe Gelendyik Airport. Es wird davon ausgegangen, daß Rußland ca. 250.000 Mobilfunkmasten als Schutz gegen Raketenangriffe mit hochwertigen GPS-Störeinrichtungen ausgestattet hat.

Je umfangreicher die Anwendungen und Abhängigkeiten von GNSS werden, desto größer wird auch der Anreiz für absichtliche Störaktivitäten (vergl. Internet-Hacker). Zahlreiche Infrastrukturbereiche, auch in Deutschland, stützen sich auf die Zeitinformationen von GPS. Der 11. Sept. 2001 hat gezeigt, daß alles was geschehen kann auch geschieht. In den USA gehören daher die Nutzer von Zeit-Informationen auch zu den stärksten Verfechtern einer GPS-Redundanz.

Professor David Last:

*"With GPS so deeply engrained into our systems and infrastructure that it has earned the nickname "the blind utility," it is easy to forget that GPS systems are vulnerable to attack. GPS systems can be hacked without ships or control towers even realising to potentially catastrophic effect."*³

³ Prof. David Last, Consultant on radio-navigation and communications systems to companies, governmental and international organisations. He is also active as a forensic Expert Witness, focussing on GPS-related cases for law enforcement agencies and defence lawyers.

Stützung der Satelliten-Signale

Der erste Ansatz einer partiellen Absicherung war Differential-GPS (**DGPS**, Oberbegriffe: **Ground-Based Augmentation System, GBAS** aber auch **Local-Area Augmentation System, LAAS**). Von einer Referenz-Station, werden international standardisierte GPS-Korrekturen ermittelt und ausgesendet. Die Verwendung der Korrekturen in der Bordanlage ergibt in einem begrenzten Gebiet um die Referenz-Station einen auf etwa $\pm 3\text{m}$ verminderten Fehler. Viel wichtiger ist aber, daß sich die Integrität von GPS verbessert, d.h. es wird rechtzeitig vor an Bord nicht erkennbaren Mängeln der Satelliten-Signale gewarnt. Der geringe Positionsfehler von $\pm 3\text{m}$ ist für die normale Navigation ohnehin nicht erforderlich, schon jetzt erfordern $\pm 10\text{m}$ erhöhte Aufmerksamkeit, da viele Seekarten diese Genauigkeit nicht unterstützen.

Inzwischen gibt es in Europa ca. 160 DGPS-Sender, sie arbeiten auf den ehemaligen Funkfeuerfrequenzen. Die Nutzung ist kostenlos. Die Abdeckung der gesamten USA mit DGPS (Nationwide DGPS, NDGPS) wurde inzwischen auf 39 Stationen der Coast Guard und 7 des Army Corps of Engineers reduziert. In Deutschland entstanden 5 zusätzliche DGPS-Stationen (Zeven/Niedersachsen, Koblenz, Iffezheim/Baden-Württemberg, Bad Abbach/Bayern, Mauken/Oberelbe/Sachsen-Anhalt). Sie sollen die Binnengewässer abdecken, mit dem Nebeneffekt, daß sie das gesamte Bundesgebiet versorgen.

Es gibt daneben mindestens ein privates, gebührenpflichtiges globales DGPS (GreenStar) der Firma John Deere.

Die **GBAS**-Stationen lassen sich örtlich jedoch ebenso leicht stören wie GPS-Anlagen.

Ein weiterer Ansatz waren satellitengestützte **Differential-Systeme (Space-Based Augmentation System, SBAS)**, sie unterscheiden sich in ihrer Funktion von den erdgebundenen DGPS (**GBAS**). Beiden gemeinsam ist jedoch, daß sie **bei Ausfall des gestützten Systems nutzlos** sind.

Nach erfolgreichen Versuchen mit einem geostationären INMARSAT-Nachrichten-Satelliten, werden jetzt von 3 GEO-Satelliten (15,5°W (L1), PRN120 / 31,5°E, PRN123 (L1, L5) / 5°E, PRN 136 (L1, L5) Testbetrieb) Korrekturen für GPS und Warnungen bei Störungen verbreitet. Dieses als **EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)** bezeichnete System deckt Europa, Atlantischen Ozean, teilweise Nord-Afrika und Mittleren Osten ab. Inzwischen wird an EGNOS V3, das auch GLILEO stützen soll, gearbeitet. Das System ist dem amerikanischen **Wide Area Augmentation System, WAAS (L1, L5)** (Satelliten auf 133°W, PRN135, Backup / 107,3°W, PRN138 / 117°W, PRN 131, Test) vergleichbar und sollte, wie dieses, primär der Luftfahrt dienen. Inzwischen wird es aber auch erfolgreich in anderen Verkehrsbereichen genutzt. Auch für den Sportboot-Bereich gibt es entsprechende Anlagen.

Ähnliche Entwicklungen gibt es auch von Kanada (**CWAAS**), China (Satellite Navigation Augmentation System, **SNAS**) und Indien **GAGAN (L1, L5)**, 93,5 °E, PRN 132, Reserve / 55°E, PRN127 / 83°E, PRN 128. Auch Rußland baut ein System auf „Glonass System of Differential Correction and Monitoring“ **SDCM (L1)**, Loutch-5A 167°E, PRN 140, Loutch-5B, 16°E, PRN 125, Loutch-5V, 95°E, PRN 141. Für Russland soll sich der GLONASS-Fehler auf 1-1,5m vermindern; auch die GPS-Signale sollen beobachtet werden.

Die Struktur der abgestrahlten Signale wurde genau wie bei DGPS international genormt. Es sind auch hier Referenzstationen beteiligt und zwar eine Vielzahl. Die Verteilung der Informationen an die Nutzer erfolgt über die geostationären Satelliten. Die Bezeichnungen für die betei-

lichten Einrichtungen bei den verschiedenen SBAS sind nicht einheitlich, obwohl ihre Aufgaben identisch sind.

Nachfolgend werden zur Erklärung die Bezeichnungen von EGNOS benutzt.

Über das Versorgungsgebiet sind zahlreiche **Reference and Integrity Monitoring Stations (RIMS)** verteilt. Von ihnen werden die Entfernungsfehler zu den jeweils sichtbaren Satelliten ermittelt. Sie werden jedoch nicht als Korrekturen direkt an die Nutzer verteilt. Stattdessen werden sie in einer zentralen Kontrollstation, **Mission Control Center (MCC)**, verarbeitet. Davon gibt es ebenfalls zur Sicherheit mehrere, es ist jedoch nur jeweils eine aktiv. Die verschiedenen Fehleranteile des Satelliten-Signals arbeitet man dort heraus. Uhren-, Bahndatenfehler können dabei dem jeweiligen Satelliten zugeordnet werden, während der Ionosphären-Ausbreitungsfehler ortsabhängig ist. Er wird für die Punkte eines Gitternetzes berechnet, dessen Größe sich aus der geographischen Verteilung der vorhandenen 39 RIMS ergibt. Dieses mit Werten besetzte Netz bestimmt das Versorgungsgebiet. Ein weltweit gültiges Gitternetz wurde definiert, die Punktabstände betragen zwischen 55°N und 55°S jeweils 5° in Breite und Länge, in höheren Breiten bis 75° erhöht sich der Abstand auf 10°. Abhängig von der Geschwindigkeit mit der sich die verschiedenen Fehler ändern, erfolgt die Aufdatierung der Korrekturen alle 1 bis 5 Minuten. Sie werden von 6 Erdstationen, **Navigation Land Earth Station (NLES)**, je 2 für jeden GEO-Sat., zum geostationären Satelliten übertragen.

Alle GEO-Satelliten geben die Informationen in einem genormten Datentelegramm an den Nutzer weiter. Er sollte aus Sicherheitsgründen jeweils die Signale zweier GEO-Satelliten empfangen können. Die GPS-Anlage des Nutzers korrigiert dann Uhren-, Bahndatenfehler der benutzten GPS-Satelliten direkt. Die empfangenen Ausbreitungskorrekturen für die zur eigenen Position nächstgelegenen Gitternetzpunkte werden gemittelt. Das Ergebnis dient dann dazu, das im GPS-Empfänger benutzte Ionosphären-Ausbreitungsmodell zu verbessern. Ohne diese Korrektur verwendet der GPS-Empfänger ein globales, von den GPS-Satelliten etwa wöchentlich aufdatiertes Ausbreitungsmodell, das keine zeitlich und/oder örtlich begrenzt auftretenden Unregelmäßigkeiten berücksichtigen kann, wie sie beispielsweise Sonnenaktivitäten erzeugen.

Da von den Referenzstationen die GPS-Satelliten auch auf Signalmängel beobachtet werden, kann gegebenenfalls innerhalb von 6s (Luftfahrtforderung) eine entsprechende Warnung der Nutzer erfolgen.

Alle Informationen werden von den GEO-Satelliten auf der gleichen Frequenz (1575,42 MHz) ausgestrahlt, die auch für das zivil nutzbare GPS-Signal L1 verwandt wird. Ein zusätzlicher Empfänger, wie er beim bodengestützten DGPS erforderlich ist, entfällt daher. Hinzu kommt, daß auch die Struktur des Signals ähnlich der des GPS-Signals gewählt wurde. Dadurch können die geostationären Satelliten wie zusätzliche „GPS-Satelliten“ auch für die Standortbestimmung mit herangezogen werden. Wegen dieser Zusatzfunktion werden sie von den Referenzstationen wie die GPS-Satelliten beobachtet und ihre eventuell fehlerhaften Daten korrigiert bzw. ihre Funktion „GPS-Satellit“ abgeschaltet, ohne daß davon die Übertragung der Korrekturdaten und Warnungen beeinflusst sein muß. Die GEO-Satelliten unterliegen darüber hinaus aber ähnlichen Beschränkungen wie die GPS-Satelliten, ihre Signale können abgeschattet werden, außerdem sind sie auf hohen Breiten nicht zu empfangen.

Die GPS-Ergänzung, zukünftig auch für GALILEO (FOC), durch SBAS hat drei Aspekte:

- 1) Integritätsgewinn durch schnelle Warnung (6s) bei vom Nutzer nicht erkennbaren Signalmängeln einzelner GPS-Satelliten,
- 2) Verminderung des Standortfehlers durch Verbesserung des Ausbreitungsmodells,
- 3) Erhöhung der Satellitenanzahl für die Standortbestimmung.

Es gibt daneben noch einige firmeneigene DGPS-Netze z.B. von Thales, Racal, Fugro, die allerdings nur gegen eine Gebühr genutzt werden können. Weitere Stützungsverfahren mittels Satelliten sind angedacht. Auch LIGADO (s. S. 13) will ein Netz aufbauen. IRIDIUM bietet ein System mit 20-50m Positionsfehler an. Mit seiner Empfindlichkeit auf die Bewegung des Nutzers ähnelt es dem ehemaligen TRANSIT (NNSS, Navy Nav. Sat. System).

Es darf allerdings nicht übersehen werden, daß im Konfliktfall auch die Wirksamkeit der Differential-Korrekturen durch Manipulationen an GPS beeinträchtigt werden kann! **Bei Ausfall von GPS ist jede Form eines Differential-GPS ohnehin völlig nutzlos. DGPS bietet auch keinen Schutz gegen örtliche Störsender.** Es müßte also immer angestrebt werden, ein zweites, unabhängiges Navigations-Verfahren als Redundanz heranzuziehen. Hier wäre auch GALILEO oder GLONASS hilfreich.

Ein anderes Stützungsverfahren plant Japan begrenzt auf sein Territorium. Im Rahmen des **Multi-Function Transport Satellite (MTSAT)**, wird ein **Quasi Zenith Satellite System (QZSS)** entwickelt. Mit den 3 Satelliten, Erweiterung auf 7, die zu GPS identische Signale (L1, L2C, L5) senden werden, soll die Positionsermittlung in Tälern und städtischen Häuserschluchten verbessert werden. Die ersten MICHIBIKI (Guide)-Satellit QZS-1 (L1), 135°E, PRN 183, Testbetrieb und OZS-2 (L1, L2), 136°E, Inklination $\geq 5^\circ$ sind im Umlauf.

Redundanz zur Satelliten-Navigation

Ein von Luftfahrtinstitutionen (FAA, AOPA und JATA) an die APL John Hopkins Univ. gegebener Studienauftrag "GPS as Stand Alone System" ergab, daß GPS aus Sicherheitsgründen, zumindest in der Luftfahrt, als einziges Navigationsmittel (sole mean) ohne Stützung (z.B. Differentialverfahren, LORAN-C) nicht zu verantworten sei. Insbesondere wurde die Gefahr absichtlicher oder unabsichtlicher Störungen untersucht. Die intensiven amerikanischen Untersuchungen, wieweit LORAN-C, eventuell ein verbessertes, sogenanntes **eLORAN**, als Redundanz für GPS für See- und Luftfahrt genutzt werden kann, ergaben positive Ergebnisse. Selbst die hohen Anforderungen von 8...20m Fehler für die Hafen-Navigation (HEA) konnten erfüllt werden. Die Entscheidung zur Einführung fiel im Febr. 2008. Für diese notwendige Redundanz setzen auch die große Zahl der Nutzer von Zeitsignalen stark auf eLORAN. Eine Anpassung an die Erfordernisse von eLORAN war bereits bei 20 der 24 Stationen erfolgt, als unmittelbar nach Veröffentlichung des Federal Radionavigation Plan 2008 mit seiner Bestätigung der GPS-Redundanz durch eLORAN im **US Haushaltsplan 2010** die **Mittel für Loran gestrichen** waren. Ersparnis 2010 \$36 Mio. und \$190 Mio. über 5 Jahre. Gleichzeitig wurde eine 2 Jahre („Summary of Initial Findings on eLoran“ März 2007) zurückgehaltene Studie des Independent Assessment Team (IAT, Vorsitz Prof. Brad Parkinson, Vater von GPS) vom Institute for Defense Analyses veröffentlicht. Sie zeigt nochmals die Notwendigkeit einer Redundanz zu GPS auf und hält einzig eLORAN für geeignet.

Gegen die Mittelstreichung **gab es erheblichen Widersand** seitens des Senats. Committee on Commerce, Science and Transport sowie Committee on Homeland Security and Government Affairs, hatten sie doch noch im Apr. 09 für eLORAN gestimmt. Inzwischen steigt der Druck auf die Verwaltung, eine Redundanz zu schaffen. Er wird verstärkt durch den 11stündigen Totalausfall von GLONASS, das mehrtägige GPS-Zeitproblem im Jan. 2016 aber auch als Folge der Gründung der **Resilient Navigation and Timing Foundation** (RNT, www.rntfnd.org), die auch private Beteiligung (PPP) vorschlägt. Die USCG hat zumindest die Demontage der LORAN-C-Stationen gestoppt. Inzwischen liegen dem US Gesetzgeber erneut Eingaben zur Stützung mittels eLORAN vor.

Für die Europäische Kommission ist die Zukunft von LORAN, trotz der vergleichsweise geringen jährlichen Betriebskosten (**NELS**, North-West European Loran-C System, €4,2 Mio., EGNOS €110 Mio.), ohne Interesse, auf der Tagesordnung steht GALILEO. Auf Wunsch der EU sollten aber überraschenderweise bisher alle LORAN-Stationen bis zur Vorlage des Europäischen **Radio-Navigationsplanes (ERNP)** weiterlaufen, einschließlich der deutschen Sylt-Station, mit Betriebskosten aus England.

GALILEO verfügt für Politiker weiterhin über eine magische Immunität gegen Störungen. Im Entwurf des ERNP wurde LORAN zwar nach langen Diskussionen aber als wesentlicher Bestandteil eines notwendigen **Navigations-Verfahrens-Mix** vorgesehen und vorgeschlagen die gesamte EU mit LORAN (eLORAN) abzudecken. Die EU-Entscheidung über die endgültige Fassung des ERNP wurde an den Abschluß der Galileo-Konzessionsverhandlungen gekoppelt, die wegen Fragen der Risiko-Verteilung (privat/staatlich, Public Private Partnership) scheiterten. Inzwischen sind einige EU-Staaten verärgert, daß der **ERNP** noch immer nicht vorliegt, **es wird ihn wohl auch nicht mehr geben**. UK hat inzwischen seinen eigenen GLA Radio-Navigations-Plan.

In **England** will die General Lighthouse Association (GLA) die Zahl der Leuchttürme vermindern. Sorgen bereitet ihr aber das **übermäßige Vertrauen der Nutzer in GPS**. Es zeigte sich, daß LORAN das Potential als notwendiges Backup für GPS besitzt, allerdings modifiziert als **eLORAN**. Es wurde ein 15 Jahresvertrag für Entwicklung, Aufbau und Betrieb an VT Communication für eine Station in Cumbria vergeben. Diese eLORAN-Station hat ihren Betrieb bereits aufgenommen. England ist bestrebt ein europäisches eLORAN-System aufzubauen. An Standards für eLORAN wurde international (RTCM, usw.) gearbeitet.

Am 1. Dez. 2015 verkündete Trinity House dann mit der Notice to Mariners 27/2015 **“General Lighthouse Authorities Enhanced Loran (eLoran) Initial Operational Capability (IOC) Prototype And Trials Service Discontinued”**, “Mariners are advised that from 1100 UTC on 31st December 2015 all currently equipped eLORAN and LORAN-C receivers in northwest Europe will cease to function correctly and such receivers should be switched off until further notice.

Am 16. Jan. 2016 wurde TAVIGA gegründet mit dem Ziel ein Positioning, Navigation and Timing Low Frequenz Network in UK, EU und USA zu schaffen. Es begannen Gespräche der EU-Länder mit LORAN-Stationen, die Demontage der Stationen wurde ausgesetzt.

Südkorea baut zum Schutz gegen die nordkoreanischen GPS-Störungen zu den bestehenden 2 LORAN-Stationen 3 weitere zur vollständigen Abdeckung seines Territoriums. Alle 5 Stationen werden **eLORAN**-Stationen, dazu kommen 48 Differentialstationen. Der vorläufige Betrieb (IOC) sollte 2017 aufgenommen werden und der endgültige (FOC) 2018 erreicht sein.

Im maritimen Bereich wird daneben am sogenannten R-Mode als kleinräumiger Stützung gearbeitet. Er erfordert neue Technik, Infrastruktur, Standards und internationale Vereinbarungen.

Enhanced LORAN

Enhanced LORAN (eLORAN) arbeitet nicht mehr im Hyperbel-Modus und weist gegenüber dem herkömmlichen LORAN bei Verwendung derselben Frequenz folgende Unterschiede auf: Es besitzt einen Datenkanal über den Korrekturen, Warnungen und Zuverlässigkeitsinformationen übertragen werden. Zu diesen Daten gehören beispielsweise Stationskennung, Almanach der Sender, Positionen der Monitorstationen für Differential-LORAN, Diff. des LORAN-Zeitschemas zu UTC (Anzahl Schaltsek.), Warnungen bei anormalen Signalausbreitungsbedingungen (z.B. auch verkürzte Skywave-Wege), Warnung bei Signalmängeln, Korrekturen für Diff.-LORAN und Diff.-GNSS. Alle Sender werden auch hier wie bei GPS untereinander synchronisiert. Es werden jedoch bei GPS und LORAN voneinander unabhängige UTC-Quellen genutzt. Wenn ein eLORAN-Signal außerhalb der Toleranz liegt wird die be-

treffende Station sofort abgeschaltet.

Da eLORAN-Signale, wie die GPS-Signale unter sich synchronisiert sind, können Navigationsanlagen gebaut werden, die beide Verfahren gleichzeitig nutzen. Jeder LORAN-Sender wird hierbei als zusätzlicher, "Pseudo"-GPS-Satellit angesehen. Diese Methode gestattet es, Verfahrensmängel sowohl bei LORAN als auch bei GPS zu erkennen, dies wäre bei Nutzung nur eines Verfahrens nicht möglich.

Die amerikanische eLORAN-Entwicklung wurde ausgelöst durch die Techn. Universität Delft. Sie entwickelte eine Methode, das LORAN-Signal (100 kHz) mit DGPS-Korrekturen zu modulieren. Dies als **EUROFIX** bezeichnete Verfahren wurde auf den Stationen Sylt, Bø, Værlandet (Norw.) und Lessay (Frankr.) installiert. Die Korrekturen ergaben GPS-Positionsfehler von $\pm 3\text{m}$ (95%) in einer Entfernung von 400km; auch in Gebirgstälern (Alpen, 1000km Entfernung) und Häuserschluchten wurde die volle Funktionsfähigkeit nachgewiesen. Bei vollständigem Ausbau wären in vielen Gebieten mehrere EUROFIX-Stationen zu empfangen.

Parallel zu den ausgestrahlten EUROFIX-Signalen wurde auch die Entwicklung preiswerter Empfängerbausteine gefördert. Die EU stellte Mittel im Programm "Integrated Ship Control" bereit. Das GAUSS-Komitee (**G**lobal **A**ugmentation for **S**atellite **S**ystems) erarbeitete unter deutscher Leitung mit namhaften internationalen Fachleuten die IMO Spezifikationen für Frequenznutzung und integrierte Empfangsanlagen.

Mit EUROFIX ebenso wie eLORAN wird ein sehr wichtiger Integritätsgewinn erzielt. LORAN besitzt aufgrund der benutzten Frequenz, wie jedes Navigationsverfahren, systematische Fehler, hier bedingt durch unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Die Korrektur der Signalausbreitung über See vom Sender zum Empfänger wird durch den gut erfaßbaren **Secondary Phase Faktor (SF)** berücksichtigt. Sind jedoch vom Signal auch Landgebiete zu überbrücken, über denen die Ausbreitungsgeschwindigkeiten sehr unterschiedlich sind, so bedarf die Positionsbestimmung einer weiteren Korrektur, dem **Additional Secondary Phase Factor (ASF)**. Dieser zeigt eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Empfangsort. Mit EUROFIX/GPS ließ sich erstmals jederzeit und laufend die Gesamtkorrektur ermitteln (SF zuzüglich ASF), quasi als Differenz zwischen den Positionen aus LORAN und dem EUROFIX-DGPS. LORAN, auf diese Weise laufend kalibriert, wies bei Ausfall von GPS/DGPS einen Fehler von ca. 20m auf. Mit diesem Fehler ist es hervorragend als kurzzeitige Redundanz zu GPS geeignet. Für die Absicherung der internationalen Forderungen für Hafeneinfahrten kann **Differential-eLORAN** eingesetzt werden. UK erklärte am **31. Okt. 2015 IOC für 7 Ostküstenhäfen**, der Kanalbereich war bereits betriebsklar (IOC), und bis 2019 sollten alle wichtigen Häfen und Verkehrstrennungsgebiete (FOC) mit DeLORAN ausstatten sein. **Auch hier Betriebsende Dez. 2015.**

Es ist völlig unverständlich wie in Kenntnis, daß bei Störung oder Ausfall von GPS oder GALILEO, sie bieten gegenseitig nur eine bedingte Redundanz, weite Bereiche der Infrastruktur der Industriestaaten und die modernen Navigationsmittel der Schifffahrt erheblich eingeschränkt oder gar unbrauchbar wären, auf eine Redundanz zu GPS mit recht fadenscheinigen Gründen verzichtet werden kann (s. S. 3, LE Studie). Verzicht auf eLORAN erspart den USA vorgeblich \$ 190 Mio. über 5 Jahre, die nicht berücksichtigten Kosten für Abriß und Geländerenaturierung dürften um ein mehrfaches höher sein. Außerdem wurden bereits 20 von 24 LORAN-Stationen modernisiert und für eLORAN-Einrichtung vorbereitet, 5 Stationen sind schon eLORAN-fähig. Inzwischen wird auch wieder über Redundanz zu GPS diskutiert und Forschungs- und Entwicklungsvorhaben gefördert. Das Stichwort lautet aber nicht mehr LORAN sondern **LOW FREQUENCY** ohne dass sich das vorgesehene, geschützte Frequenzband 90 – 110kHz geändert hätte. Eine einfache Störung wie bei Satelliten-Signalen ist bei diesen Sender-Signalen nicht möglich.

Nach der Abschaltung des LORAN-C-Signals wurde die Hälfte der Stationen demontiert. Die Firma UrsaNav konnte für ihre, offiziell von der USCG unterstützten „Low Frquenz“-

Versuche (eLORAN abgewandelt) Stationen reaktivieren. Sie laufen weiterhin im erfolgreichen Testbetrieb.

Da in naher Zukunft Satelliten-Verfahren nicht sämtliche Anforderungen der Nutzer erfüllen können, sollte ein LOW FREQUENCY- System (eLORAN, EUROFIX oder neuerdings LF Phoenix von UrsaNav) als Stützung, insbesondere aber als Integrationsbestandteil eines **robusten Navigationssystems**, dienen. Die Integration sollte dabei auf der Nutzerebene, d.h. in der Navigationsanlage erfolgen. Ein Beispiel ist der Empfänger eLGPS 1110 von CrossRate Technology/UrsaNav.

Mit einem redundanten **LOW FREQUENCY-SYSTEM** könnte auch die internationale IMO-Forderung für E-Navigation erfüllt werden (eNavigationssysteme should be resilient ... robust, reliable and dependable. Requirements for redundancy, particularly in relation to position fixing systems should be considered, MSC 85/26, Annex 20; eNavigationssysteme steht für enhanced Nav.-Systeme).

Dieser Tatbestand wurde dem BMVBS (vorm. BMVBW) offenbar inzwischen ebenso wie das Gefährdungspotential bei GPS und GALILEO bewußt, warum sonst hätte man Sylt ohne festen Abschalttermin weiterbetreiben lassen. Nur die Aktivitäten für Reaktionen, wie Havarie-Kommando oder Seeunfalluntersuchungsbehörde genügen nicht, so notwendig sie auch sind. Das Schicksal des europäischen LORAN-Netzes, selbst in modifizierter Form, als Ergänzung und Sicherung der Satelliten-Navigation ist weiterhin ungewiß, da es am 31. Dez. 2015 abgeschaltet wurde.

Moderne eLORAN-Anlagen sind genau wie GPS-Anlagen für die Signalverarbeitung aller in Sicht befindlichen Sender ausgelegt (all-in-view). Mit EUROFIX wie eLORAN könnte ohne weiteres die Zahl der DGPS-Stationen mit den ehemaligen Funkfeuerfrequenzen erheblich reduziert werden.

Verglichen mit den Geldern für die Entwicklung und den Aufbau von EGNOS (jährliche Betriebskosten € 110 Mio.) und GALILEO sind die Kosten für eine europaweite Erweiterung auf eLORAN und den unbemannten Betrieb, Wartungspersonal auf den Monitorstationen, vernachlässigbar.

Eine gegenseitige Absicherung der verschiedenen Sat.-Nav.-Systeme ist nur begrenzt möglich. Das US Militär entwickelt ein von GPS unabhängiges, relatives, jeweils örtlich begrenzt nutzbares Nav.-System (z.B. Luftbetankung). Im Jan. 2016 warnte die USCG vor GPS-Störungen mit den Auswirkungen auf die gesamten GPS-gestützten Navigationseinrichtungen. Es wurde auf die Verwendung von **Radar (head up), Magnetkompaß und terrestrischer Navigation** zur sicheren Schiffführung verwiesen. Im militärischen Bereich wird inzwischen wieder in **Astronomischer Navigation** ausgebildet. Einzelheiten sind wegen Geheimhaltung nicht bekannt. Es wird sicher nicht die herkömmliche Ortsbestimmung mittels Sextant mit seinen doch zeitlichen und wetterbedingten Einschränkungen gelehrt. Konnten doch bereits die Wikinger die Sonne auch bei bedecktem Himmel zur Navigation verwenden. Sie nutzten Kristalle mit speziellen optischen Eigenschaften.

Kombinierte Navigationsanlagen für GPS, GLONASS und GALILEO werden bereits angeboten, um Mängel des einen Verfahrens durch ein anderes ausgleichen bzw. den Positionsfehler vermindern zu können. Die Methode, entsprechende Software vorausgesetzt, hat ihre Brauchbarkeit bewiesen. Ebenso gibt es kombinierte GPS/GALILEO-Anlagen, nicht nur zur gegenseitigen Stützung sondern auch zur Verminderung des Positionsfehlers.

Es darf aber nicht verkannt werden, daß die Kombination zweier Satelliten-Verfahren, die im gleichen Frequenzbereich und mit etwa gleicher, kleiner Leistung arbeiten, auch

sehr einfach simultan (jamming) gestört werden können, im Gegensatz z.B. zur Kombination GNSS / eLORAN.

Eine steigende Zahl nutzbarer Satelliten (GPS, Galileo zusammen ca. 60) erhöht zwar die Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung. Gleichzeitig trägt aber jeder Satellit mit seiner Sendeleistung zur Erhöhung des Umweltrauschens bei. Ab ca. 70 Satelliten könnte sich daraus ein zusätzliches Empfängerproblem ergeben (ESA, Prof. Dr. Gunther Hein).

Eine in GPS selbst begründete Sicherungsmöglichkeit stellt **RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring)** dar. Bei einem Überangebot an nutzbaren GPS-Satelliten, augenblicklich sind bis zu 31 statt 24 aktiv, wird vom Empfänger über mathematische Methoden auf mangelbehaftete Satelliten-Signale rückgeschlossen und diese bei der Positionsberechnung ausgeschlossen. Sind jedoch die Signale von mehr als einem Satelliten fehlerhaft, kann es Probleme geben. Hier könnte Galileo, mit entsprechender Anlagen-Software, eine zusätzliche Absicherung ergeben (z.B. **ARAIM, Advanced RAIM**). Diese Technik ist für zulassungspflichtige GPS-Anlagen inzwischen vorgeschrieben. Sportboot-Anlagen sind nicht zulassungspflichtig und verfügen bisher noch nicht über diese Technik. Es gibt für nichtzulassungspflichtige Anlagen bisher keinerlei minimale Anforderungen.

Vielleicht werden zukünftig Satelliten-Navigation-Anlagen aber auch, um zeitlich begrenzte Ausfälle zu überbrücken, mit **Mikro-Electro-Mechanischen-Systemen (MEMS)**, quasi miniaturisierte Trägheitssysteme kombiniert,

Fazit:

- 1) Es können zwei **Zeitabschnitte** unterschieden werden:
 - a) bis zur Betriebsaufnahme eines zivil kontrollierten Satelliten-Navigationssystems (GALILEO 2020?) oder Redundanz-Verfahren
 - b) nach Betriebsaufnahme des zivilen Systems

- 2) Folgende **Veränderungen** sind in den Zeitabschnitten zu erwarten:
 - a) GPS kann benutzt werden, wegen fehlender Integrität sollte jedoch parallel aus Sicherheitsgründen ein redundantes Verfahren, mindestens aber GBAS oder SBAS eingesetzt werden. Ein LOW FREQUENZ-System könnte integriert mit GPS als Redundanz zu GPS dienen.
LOW FREQUENZ-Systeme werden ausgebaut??
 - b) Ein hoffentlich international verwaltetes und betriebenes Satelliten-Navigationssystem (GNSS) oder Sat.-Nav.-Überwachungs- bzw. Ergänzungsverfahren und notwendige Redundanz wird den Betrieb anderer Funknavigationssysteme dann bei vielen aber nicht allen Anwendungen überflüssig machen.

Zum Abschluß **Dr. Brad Parkinson, The father of GPS:**

“Reliance on satellite navigation and timing systems has become a single point of failure for much of America and is our largest, unaddressed critical infrastructure problem.”

Am 27. Juni 2017 äußerte er auf ION-Tagung 3 Wünsche:

1. That deployment of eLoran begins immediately.
 2. That low-cost very jam resistant GNSS receivers are commercially available.
 3. That FCC does not approve repurposing of adjacent spectrum until / unless proposal passes realistic evaluation of all current and future GNSS signals, application and techniques.
-
1. Daß eLORAN schnellsten bereitgestellt wird.
 2. Daß kostengünstige, hervorragend Jamming resistente GNSS-Empfänger verfügbar sind.
 3. Daß vom FCC (*Zulassungsbehörde Frequenznutzung*) keine Genehmigung für die Umwidmung von benachbarten Frequenzen (*Satelliten-Frequenzen, z.B. Lightquared o.ä.*) erfolgt, es sei denn es liegt eine realistische Auswirkungseinschätzung auf alle derzeitigen und künftigen GNSS-Signale, -Anwendungen und -Techniken vor.

Das Druckwerk ist als Manuskript zu betrachten. Eine Veröffentlichung im ganzen oder in Teilen bedarf, wie die Vervielfältigung auf fotomechanischem Wege, der schriftlichen Genehmigung des Verfassers

*Mitglied: Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation, DGON
Royal Institute of Navigation, RIN, UK
Institute of Navigation, ION, USA