Die Zeit ist eine Größe, die sich nicht fassen lässt, die aber nicht nur in unserem Leben eine wichtige Rolle spielt, sondern auch in vielen technischen Systemen. Wie in jedem modernen Satellitennavigationssystem bildet auch beim europäischen System Galileo die exakte Zeitmessung die wesentliche Grundlage für die genaue Positionsbestimmung des Nutzers. Im Empfänger, der Signale von mehreren Satelliten gleichzeitig empfängt, wird zunächst die Zeitdifferenz zwischen der Uhr im Empfänger selbst und der Zeitmarke aus dem Signal eines Satelliten bestimmt und die so gewonnene Laufzeit (bei bekannter Satellitenposition) in eine Entfernung umgerechnet. Aus mehreren solcher Entfernungen zu verschiedenen Satelliten wird dann die Nutzerposition geschätzt.

Am PULS von

Von Prof. Dr. Arno Schroth, Jens Hammesfahr, Alexandre Moudrak

Damit dieses Ortungs-Prinzip richtig funktioniert, müssen alle Satellitenuhren miteinander sehr genau synchronisiert werden. Diese Synchronisierung erfolgt über eine präzise Referenzuhr im Galileo-Bodensegment, indem man mithilfe von Messungen, die über weltweit verteilte Bodenstationen durchgeführt werden, die relative zeitliche Lage von allen Satellitenuhren gegenüber dieser Referenzuhr bestimmt. Der Gang der Satellitenuhren kann dann vorhergesagt und zu den Nutzern über die Satelliten-Navigationsnachricht übermittelt werden. Die von der präzisen Atom-Uhr am Boden abgeleitete Zeitskala heißt Galileo Systemzeit (GST). Sie dient als Referenz für alle Vorgänge im System und kann als „Puls" des Systems verstanden werden.

Andererseits ist aber Galileo nicht nur ein Ortungs- sondern auch ein Zeitverteilungssystem, weil Nutzer über Galileo Zugriff auf die internationale Referenzzeit TAI (International Atomic Time) bekommen können. Um das zu ermöglichen, wird die Bezugszeit GST gegenüber TAI vermessen und die Differenz zwischen den beiden Zeitskalen ebenfalls im Datenkanal der Satelliten-Signale an die Nutzer übermittelt. Die Vermessung geschieht in Zusammenarbeit mit europäischen Zeitlaboratorien, die mithilfe ihrer hochpräzisen Atomuhren (unter anderem werden auch neuartige Uhren wie Cäsium-Fontänen eingesetzt) eine Zeitskala mit möglichst guter Annäherung an die internationale Referenzzeit TAI produzieren.

Die Anbindung an TAI ermöglicht es Galileo auch, zahlreiche Zeitanwendungen zu bedienen, wie z. B. hochgenaue Zeit-Messung (Metrologie), Kalibrierung von Atom-Uhren, Synchronisation von Mobilfunk-Referenzstationen und andere Telekommunikationsanwendungen, wie Synchronisation von Computer-Netzwerken in verschiedenen Bereichen, Zeit-Stempeln von Transaktionen im elektronischen Dokumentenaustausch und Bankwesen usw.

Diese zwei Aufgaben – Synchronisation von Satellitenuhren und Bereitstellung von Zeitdiensten – haben starken Einfluss auf Architektur, Aufbau und Betrieb des Galileo-Systems.

Die Systemzeit für Galileo wird von hochgenauen Atom-Uhren in der Galileo-Zeiteinrichtung (Precise Timing Facility, PTF) erzeugt werden. Dazu wird ein Signal mit sehr stabiler Frequenz am Ausgang eines Wasserstoff-Masers (der stabilste Uhrentyp, der zurzeit kommerziell für zuverlässigen Einsatz verfügbar ist) dienen, das mithilfe eines so genannten Mikrophasenschiebers zu TAI nachgesteuert wird. Am Ausgang der PTF wird die Zeit physikalisch (als 10-MHz- und 1-Puls-pro-Sekunde-Signal) zur Verfügung stehen.
Die Zeiteinrichtung selbst ist ein Teil des Galileo-Bodensegments und soll dem Galileo-Kontrollzentrum angegliedert werden. Die PTF wird mit sechs Atomuhren ausgestattet: Zwei aktive Wasserstoff-Maser und vier Cäsium-Uhren, die dazu dienen, den

GALILEO

PTF-Funktionen:

- **Bereitstellung der Galileo-Systemzeit (GST),**
- **GST-Steuerung zu TAI (mithilfe von europäischen Zeitlaboratorien),**
- **Verbreitung der GST zu anderen Galileo-Einrichtungen,**
- **Bestimmung der Zeitdifferenz zwischen den Systemzeiten von GPS (dem amerikanischen Satelliten-Navigationssystem) und Galileo**

langfristigen Gang der Maser auszugleichen. Dieser Ausgleich wird dadurch erforderlich, dass die Konstanz der Zeitsignale – die so genannte Stabilität – bei verschiedenen Uhrentypen über verschieden lange Zeiträume des Betriebs unterschiedlich ist. Über kurze Zeiträume sind Wasserstoff-Maser sehr stabil, über lange Zeiträume hingegen Cäsium-Uhren.

Da Galileo – im Gegensatz zu GPS – Garantien über die Zuverlässigkeit für einige seiner Dienste übernehmen wird, sind die Anforderungen an die PTF sehr hoch. Der Galileo-Puls darf deshalb nie aufhören zu schlagen. Im Rahmen einer ESA-finanzierten Studie zum Galileo-Design (Galileo Phase C0), die von einer deutschen Industriefirma geleitet wurde, hat das Institut für Kommunikation und Navigation Berechnungen zur Zuverlässigkeit der PTF ausgeführt sowie ein Redundanz- und Umschaltungskonzept vorgeschlagen, das eine modulare Struktur der PTF vorsieht. Der modulare Aufbau vereinfacht die Zuverlässigkeitsanalyse und den Einsatz eines redundanten (zweiten) Wasserstoff-Masers, der parallel zum ersten läuft und zu ihm nachgesteuert wird. Durch den speziellen Aufbau wird eine schnelle Umschaltung ermöglicht.

Nach der am 5. Dezember 2005 bekannt gegebenen Entscheidung von ESA und EU zum weiteren Aufbau von Galileo soll eines der zwei geplanten Galileo-Kontrollzentren in Oberpfaffenhofen beim DLR aufgebaut werden. Da außerdem geplant ist, die PTF dem Kontrollzentrum anzugliedern, wird das DLR in die Lage versetzt, den Aufbau von Galileo und das Austesten der Zeiteinrichtung direkt an Ort und Stelle – auch mit der leichten Bereitstellung von Expertenwissen – optimal zu unterstützen. Zur optimalen Nutzung von Galileo wird in Deutschland zurzeit eine so genannte Test- und Entwicklungsumgebung (GATE) aufgebaut.

GATE ist eine bodengebundene Einrichtung, die Entwicklung und Tests von Galileo-Empfängern sowie Anwendungen im Navigationsbereich unterstützen soll. Das Projekt wird durch das DLR gefördert und von einem industriell geführten Konsortium mit Partnern aus Industrie und Forschung durchgeführt. Das System besteht aus sechs terrestrischen Sendern, die Galileo-ähnliche Signale abstrahlen werden, zwei Monitorstationen und einem Kontroll-Zentrum. Die Sender und Monitorstationen werden in Berchtesgaden (im Alpenraum, ca. 100 km südöstlich von München) und das Kontroll-Zentrum in Oberpfaffenhofen aufgebaut. GATE soll Anfang 2007 in Betrieb genommen werden. Ebenso wie bei Galileo spielt die Zeitsynchronisation in GATE eine zentrale Rolle. Gemäß dem vom Institut für Kommunikation und Navigation entwickelten Konzept werden die Uhren an allen Sendern gegenüber den Uhren der Monitorstationen mithilfe von eigenen GATE-Signalen synchronisiert und entsprechende Differenzsignale gemes-

© Getty

sen. Die Monitorstationen werden dann über GPS mit der GATE-Systemzeit (GAST) synchronisiert. Die GAST-Bereitstellung ist die Aufgabe der GATE-Zeiteinrichtung (GTF). Die GTF wird im Zeitlabor des Instituts für Kommunikation und Navigation aufgebaut. Das reduziert die Projektkosten (die präzisen Uhren des Labors werden bei der GTF mitbenutzt) und ermöglicht eine „automatische" Anbindung an die TAI, da das Labor eine TAI-Repräsentation produziert. Die Architektur der GATE-Zeiteinrichtung ist sehr ähnlich zur Galileo-Zeiteinrichtung ausgelegt, um Galileo-relevante Erfahrungen mit GATE zu sammeln.

Zahlreiche nationale und internationale Projekte im Zeitbereich haben es dem Institut für Kommunikation und Navigation erlaubt, reichlich praktische Erfahrungen (auch in Zusammenarbeit mit der Industrie, der Europäischen Kommission und der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA)) zu sammeln und wissenschaftliche Kompetenzen aufzubauen. Daraus entstand eine einzigartige Kombination aus wissenschaftlichem Grundlagenwissen und praktischer Erfahrung. Seit Anfang der 80er-Jahre setzen sich die Experten des Instituts mit der Zeitproblematik auseinander. Entsprechend gehört das Institut heute zu den führenden europäischen Forschungseinrichtungen. Diese Rolle wird durch einen Beraterauftrag bei Alcatel-Alenia Space manifestiert. Auf diesem Gebiet bestehen sowohl gute Kontakte zur deutschen Industrie (Kayser-Threde GmbH, EADS Astrium usw.) als auch zu deutschen und europäischen Zeit- und Forschungseinrichtungen (z. B. Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Brauschweig, Königliches Observatorium von Belgien, französische Raumfahrtagentur CNES usw.).

Auf der Basis dieser Expertisen und Kontakte arbeitet das Institut an der Weiterentwicklung und Verbesserung der Genauigkeit von Galileo. Unter anderem werden Konzepte zur Verwendung von optischen Uhren in der Satellitennavigation und der Erzeugung der Systemzeit mithilfe eines modernen Algorithmus als Mittelwert aller Satellitenuhren (Composite Clock) untersucht. Das Institut entwickelt auch Nutzungskonzepte und Algorithmen für Galileo-Zeitanwendungen. Es ist ferner an Konzepten zur Evolution von Galileo beteiligt.

Autoren:
Prof. Dr. Arno Schroth ist Leiter der Abteilung Navigation, Jens Hammesfar und Alexandre Moudrak sind wissenschaftliche Mitarbeiter im DLR-Institut für Kommunikation und Navigation, Oberpfaffenhofen.

Meilensteine Zeit:

1985: **grundlegendes und wichtiges Experiment zur Untersuchung von relativistischen Effekten mithilfe einer Atom-Uhr durch das Experiment NAVEX an Bord einer amerikanischen Weltraumfähre (Space-Shuttle). Parallel dazu wurde mit dem Aufbau des ersten GPS-Zeitempfängers in Deutschland begonnen.**

2002 bis heute: **Definition von Systemsynchronisationskonzepten und Aufbau einer Zeiteinrichtung für eine bodengebundene Galileo-Test- und Entwicklungsumgebung (GATE)**

2004: **Beteiligung an der Konzeption der Galileo-Zeiteinrichtung und der Definition von dazugehörigen Algorithmen (im Rahmen von Galileo Phase C0 Studien)**

2005 bis heute: **Beratung von Alcatel-Alenia Space (Verantwortlicher für das Galileo-Bodensegment)**