

# GBAS: FLUGVERSUCHE UND DATENAUSWERTUNG AM INSTITUT FÜR FLUGFÜHRUNG DER TU BRAUNSCHWEIG

T. Feuerle, P. Hecker  
 TU Braunschweig, Institut für Flugföhrung  
 Hermann-Blenk-Str. 27, 38108 Braunschweig

## 1. EINLEITUNG

Satelliten-basierte Navigationssysteme (Global Navigation Satellite Systems GNSS) werden zukünftig ein elementarer Baustein der Navigationsinfrastruktur in der zivilen Luftfahrt sein. Neben der klassischen Streckennavigation werden auch Anflugverfahren auf Basis der GNSS entwickelt und implementiert. Um die geforderten Genauigkeiten und Zuverlässigkeit im Landeanflug zu erreichen, sind neben den eigentlichen Satellitensegmenten unterstützende Systemkomponenten notwendig. Bei diesen sog. „Augmentation Systems“ unterscheidet man zwischen einem weltraumgestützten System (Space Based Augmentation System - SBAS) und einem bodengestützten System (Ground Based Augmentation System - GBAS).

Es ist geplant, am Forschungsflughafen Braunschweig eine GBAS-Bodenstation für Forschungsaktivitäten auf zu bauen. Das Institut für Flugföhrung der TU Braunschweig hat als vorbereitende Arbeiten unter anderem Flugversuche durchgeführt.

Weiterhin wurde das Forschungsflugzeug des Institutes, eine Dornier Do 128-6, mit einem Multi-Mode-Receiver (MMR) ausgerüstet. Dieser MMR empfängt die Signale einer GBAS-Bodenstation und generiert die für einen Anflug notwendigen Führungsinformationen für den Piloten. Mit dieser Installation wurden im Januar 2006 im Rahmen des von EUROCONTROL geförderten Projektes GIFTaS („GBAS Initial Flight Trials and SBAS comparison“) Anflüge auf einem Regionalflughafen in der Nähe von Frankfurt durchgeführt.

Im Rahmen dieses Papers werden zunächst die Grundprinzipien der Augmentation Systeme GBAS und SBAS vorgestellt. Nach einer Beschreibung des Forschungsflugzeuges und seiner experimentellen Ausrüstung sowie der durchgeföhrten Flugversuche werden die Arbeiten des Institutes bei der Datenauswertung erläutert und Ergebnisse diskutiert.

## 1.1. GNSS Anflugverfahren

Zunächst werden die grundlegenden Prinzipien der GNSS basierten Anflugverfahren vorgestellt und diskutiert. Grundsätzlich werden die zwei Systeme „GBAS“ und „SBAS“ unterschieden. Der Hauptunterschied liegt im Ausstrahlungsweg der Korrekturdaten bzw. der erzielbaren Genauigkeit beim Anwenden der empfangenen Korrekturdaten zur Positionsbestimmung. Das GBAS System ist für lokale Anwendungen hoher Genauigkeit gedacht, dort werden die Fehlerkorrekturen an einer Referenzstation für den Stationsort berechnet und über einen lokalen Sender mit einer Reichweite von etwa 50km ausgestrahlt. Bei SBAS werden, ausgehend von weit verteilten Referenzstationen (BILD 1), Korrekturen für ein Netzwerk von virtuellen Punkten über ganz Europa erzeugt, zwischen denen der Nutzer dann für seine Position interpoliert, bei etwas geringerer Genauigkeit. Die Korrekturen werden hierbei durch geostationäre Satelliten europaweit ausgetragen.

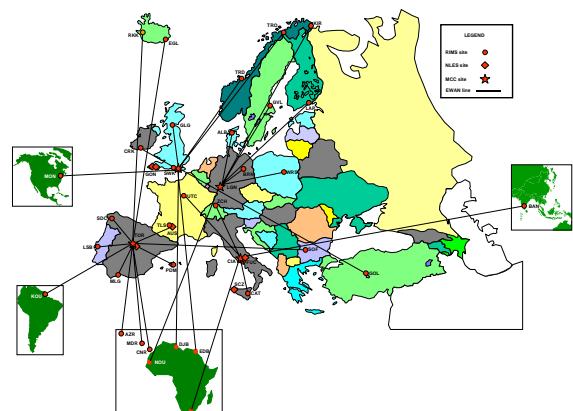
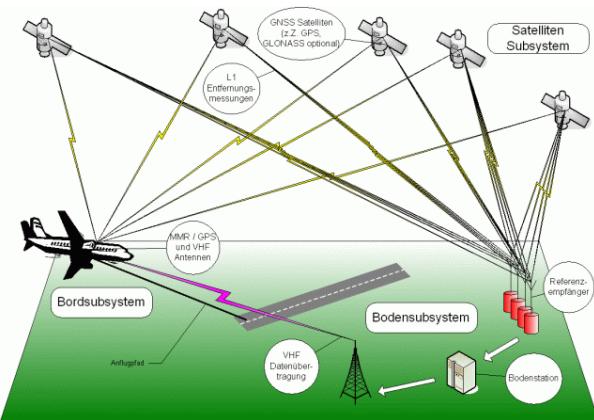


BILD 1: Bodenstationsnetzwerk bei EGNOS

### 1.1.1. GBAS

Beim GBAS („Ground Based Augmentation System“) steht in der Nähe des durchzuföhrenden Anflugverfahrens eine Bodenstation, bestehend aus zumeist 4 GPS-Empfängern, einer Recheneinheit sowie einem VDB („Very high frequency Data Broadcast“) Senders (BILD 2).



**BILD 2: Prinzipskizze GBAS**

Die zentrale Recheneinheit berechnet aufgrund der empfangenen Signale die lokalen Fehlerkorrekturen, die dann über den VDB Sender an anfliegende Flugzeuge gesendet werden. Weiterhin wird die Geometrie des Anflugpfades mit übertragen. TAB 1 gibt einen Überblick über die ausgesendeten Daten.

Nachricht-ID	Inhalt
1	Range-Korrekturen
2	Stations-Daten
4	Anflugpfad-Daten
5	Satelliten-Verfügbarkeit (opt.)
3,6-100	frei
101	GRAS
102-256	frei

**TAB 1: GBAS Nachrichten Typen**

Für die Durchführung der Anflüge ist an Bord der Flugzeuge eine entsprechende Empfangs- und Verarbeitungseinheit notwendig. Bei Verkehrsflugzeugen ist diese zusammen mit den Navigationsempfängern für konventionelle Präzisionsanflüge (ILS, MLS) im sogenannten Multi-Mode Receiver integriert (MMR). Diese MMR berechnen zunächst aufgrund der übermittelten GPS-Korrektursignale die exakte Position des Flugzeuges sowie die so genannten „Protection Levels“ (vertikal „VPL“ und horizontal „HPL“). Diese Protection Levels geben an, wie groß die Unsicherheit bzw. der geschätzte Fehler bei der Positionsbestimmung ist. Ist der geschätzte Fehler größer als ein von der Station mitgeschicktes „Alert Limit“, muss der Anflug abgebrochen werden. Liegen die ermittelten Fehlerwerte innerhalb der geforderten Toleranzen, kann der MMR zu der übermittelten Anflugtrajektorie die Ablage der aktuellen Position berechnen. Diese Ablageinformationen werden dem Piloten dann zur Verfügung gestellt bzw. auf einen Autopiloten aufgeschaltet. Aufgrund der Abhängigkeit der Korrektursignale von der geographischen Positions differenz von Referenzstation und anfliegendem Flugzeug wird

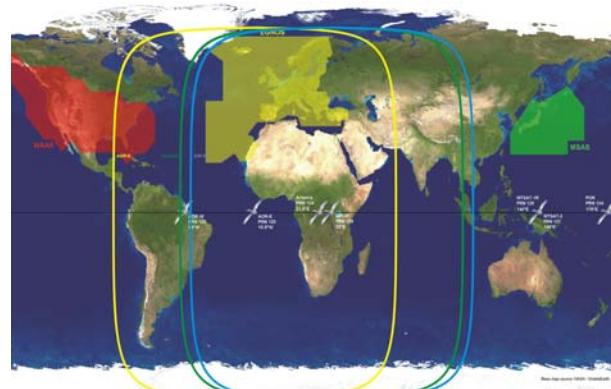
beim GBAS Anflugverfahren die Reichweite auf ca. 50 km begrenzt. Allerdings können für mehrere Anflugverfahren (z.B. mehrere Landebahnen an einem Flughafen) bzw. für nahe beieinander liegende Flughäfen ein und dieselbe Bodenstation genutzt werden. Aktuell können mit GBAS Anflüge bis zur Kategorie 1 (CAT I) zertifiziert werden. Bestrebungen sind jedoch im Gange, zukünftig auch Anflüge der Kategorien 2 und 3 (CAT II und III, schlechtere Wetterbedingungen) zu ermöglichen.

### 1.1.2. SBAS

Im Gegensatz zum GBAS werden beim SBAS die für eine präzise Positionsbestimmung notwendigen Korrektursignale über Satelliten ausgestrahlt. Weltweit gibt es derzeit 3 satellitenbasierte differential GNSS Systeme (siehe BILD 3):

- Das US amerikanische WAAS (Wide Area Augmentation System)
- Das europäische EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System)
- Das japanische MSAS (Multifunctional Satellite Augmentation System)

Diese Systeme senden Differenzialkorrekturen sowie Integritäts-Flags aus und ermöglichen somit dem Nutzer, seine eigene Positionsgenauigkeit sowie -zuverlässigkeit zu erhöhen.



**BILD 3: WAAS, EGNOS und MSAS**

In BILD 3 sind die EGNOS-Empfangsbereiche der geostationären Satelliten Inmarsat AOR-E (Atlantic Ocean Region-East) in gelb, des IOR-W (Indian Ocean Region-West) in blau und des ARTEMIS-Satelliten (grün) zu sehen. In den GNSS-Empfängern werden diese Satelliten unter den PRN 120 (AOR-E), PRN 124 (ARTEMIS) sowie PRN 126 (IOR-W) empfangen.

## 1.2. Forschungsflugzeug Dornier Do 128-6 „D-IBUF“

Das Forschungsflugzeug Dornier Do 128-6 ist für vielfältige Aufgaben ausgestattet. Neben einer großen Anzahl an Sensoren zur Bestimmung der Luftdaten (Flugzustandsvektor, Wind, Lufttemperatur und -feuchte, etc.) ist das Flugzeug mittlerweile mit einer Vielzahl an GPS-Antennen ausgerüstet. Mit diesen Antennen können sowohl GPS-Lage-Systeme zum Einsatz kommen, wie auch unterschiedliche Empfänger an eigenen Antennen eingebaut werden. Die gemessenen Daten werden mit einem selbst entwickelten echtzeitfähigen Datenerfassungssystem verarbeitet und aufgezeichnet. Ausgewählte Daten können dann auf einem Cockpit-Display im Blickbereich des Piloten zur Anzeige gebracht werden. Die experimentelle Ausrüstung ist von der primären Ausrüstung des Flugzeuges aus Zulassungsgründen getrennt. Somit ist keine Aufschaltung der Führungsinformationen auf den Autopiloten möglich. Die Piloten müssen das Flugzeug manuell fliegen.

Für die GBAS- Flugversuche wurde ein Multi-Mode-Receiver GLU-925 der Firma Rockwell Collins eingerüstet. Dieser MMR GLU-925 (Boeing Version, im Besitz von EUROCONTROL) besitzt eine luftfahrttypische ARINC429-Datenschnittstelle, über die das Gerät mit dem Bordrechner verbunden ist. Es werden sowohl Daten vom Bordrechner zum MMR (Flugzeuglage, True Air Speed, vorgewählter Anflug), als auch vom MMR zum Bordrechner übertragen. Die vom MMR gesendeten Daten werden im Bordrechner decodiert und dem Piloten zur Anzeige gebracht (siehe BILD 4).



BILD 4: Experimentelles Display

Neben den eigentlichen Führungsanzeigen (Ablage des Flugzeuges in vertikaler und horizontaler Richtung zur Sollflug-Trajektorie) werden weitere, für einen späteren regulären Einsatz nicht interessante Daten dargestellt. Somit können direkt wäh-

rend der Flugversuche erste Rückschlüsse auf die Güte der Daten und des Anfluges gezogen werden. Die von der GBAS- Bodenstation ausgesendeten Daten werden direkt vom MMR empfangen und ausgewertet. Um bei der Datenauswertung die Korrekte Funktion des MMR zu überprüfen, wurden die VDB-Signale über einen passiven Antennensignal-Splitter sowohl dem MMR als auch einem speziellen VDB- Empfänger (Telerad RE-9009) zugeführt. Mit der Dekodierung der aufgezeichneten VDB - Signale waren eine Kontrolle des MMR, eine Kontrolle der Bodenstation sowie eine Aussage über die Signalstärke in Relation zum Flugpfad und -höhe möglich.

Für die Datenauswertung ist es notwendig, die hochpräzise Position des Flugzeuges während der Anflüge zu ermitteln. Zu diesen Zwecken wurde ein GPS-Empfänger (NovAtel-OEM4) mittels eines aktiven Antennensignal-Splitters an dieselbe GPS-Antenne angeschlossen wie der MMR. Mit den Daten dieses GPS-Empfängers wurde unter zu Hilfenahme der Daten einer eigenen GPS-Boden-Referenzstation in einem Offline-Prozess eine hochgenaue Referenztrajektorie bestimmt. Außer zur Bestimmung der Referenztrajektorie wurde der zusätzliche GPS-Empfänger genutzt, um den europäischen EGNOS- Satelliten während der Anflüge mit zu tracken. Damit wäre dann ein nachträglicher Vergleich der GNSS - Anflugverfahren GBAS und SBAS möglich gewesen. Leider war aufgrund einer Störung des EGNOS Systems während der GBAS- Flugversuche der Empfang der SBAS-Korrekturdaten nicht möglich.

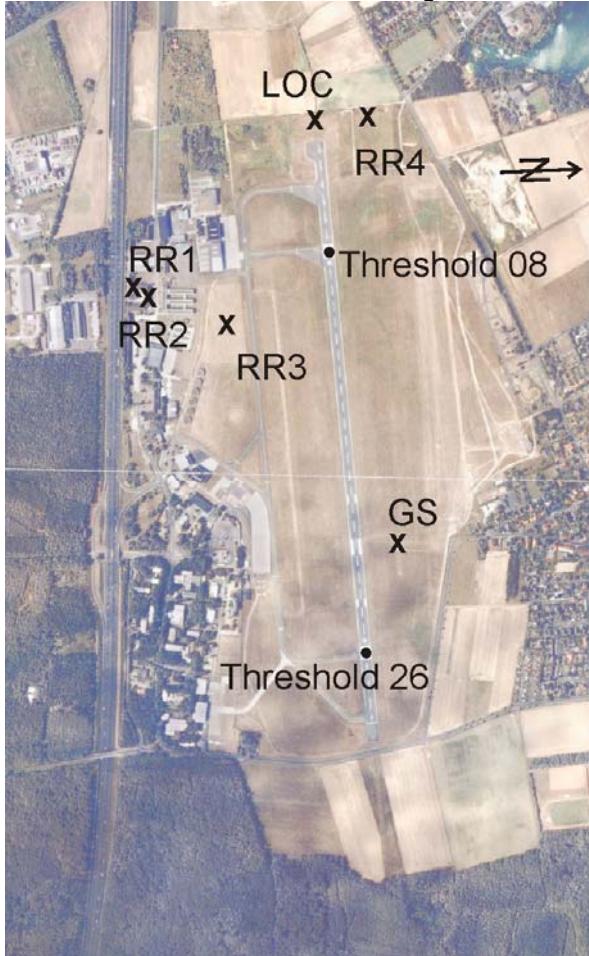
## 2. FLUGVERSUCHE

Bislang gibt es weltweit erst eine handvoll GBAS-Bodenstationen. Daher war eine Validierung der Flugzeuginstallation in Braunschweig nicht möglich. Um trotzdem frühzeitig Erfahrungen mit GBAS Daten und deren Auswertung zu gewinnen, hat das Institut für Flugführung im Oktober 2005 zunächst simulierte GBAS Anflüge in Braunschweig durchgeführt.

### 2.1. Simulierte Anflüge

Bei diesen Flugversuchen wurden mehrere Referenz-GPS-Empfänger an verschiedenen Standorten am Flughafen aufgebaut (BILD 5). Mit Hilfe des vorhandenen Instrumentenanflugverfahrens (ILS CAT I) wurden Anflüge auf die Landebahn 26 durchgeführt. Die aufgezeichneten Daten der Referenzempfänger und der flugzeugseitigen GPS-Empfänger wurden mit Hilfe des von EUROCONTROL entwickelten Softwarepaketes PE-

GASUS ausgewertet. Die Ergebnisse werden im weiteren Verlauf dieses Artikels vorgestellt.



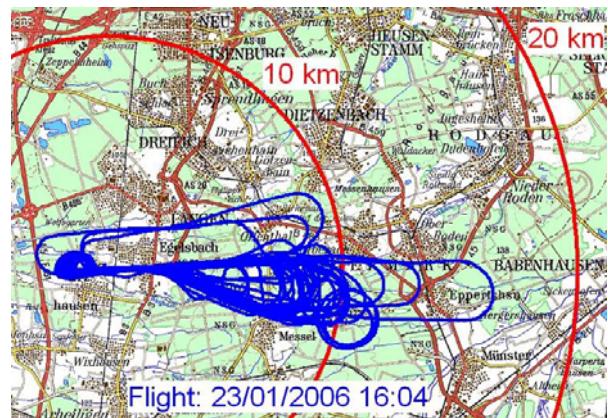
**BILD 5:** ILS und simulierte GBAS Geometrie Braunschweig

## 2.2. GBAS Anflüge Egelsbach

Im Rahmen des Projektes GIFTaS („GBAS Initial Flight Trials and SBAS comparison“), das von EUROCONTROL gefördert wurde, wurden dann im Januar 2006 reale GBAS Anflüge in Egelsbach durchgeführt. Wie in Kapitel 1.1.1 beschrieben, kann eine GBAS Bodenstation in einem Umkreis von ca. 50 km für Anflüge eingesetzt werden. Der Verkehrslandeplatz Egelsbach besitzt keine eigene Bodenstation. Für die Anflüge wurde daher die Station aus Frankfurt genutzt, die dort von der Deutschen Flugsicherung (DFS) GmbH aufgebaut wurde. Die DFS hat für die GIFTaS Flugversuche insgesamt drei unterschiedliche experimentelle GBAS- Anflüge für Egelsbach entworfen und die entsprechenden Anflugdaten in die Bodenstation eingespeist. Ziel der Flugversuche war, neben einer prinzipiellen Machbarkeit sowohl die Planungstools der DFS als auch die Auswertesoftware PEGASUS von EUROCONTROL zu validieren.

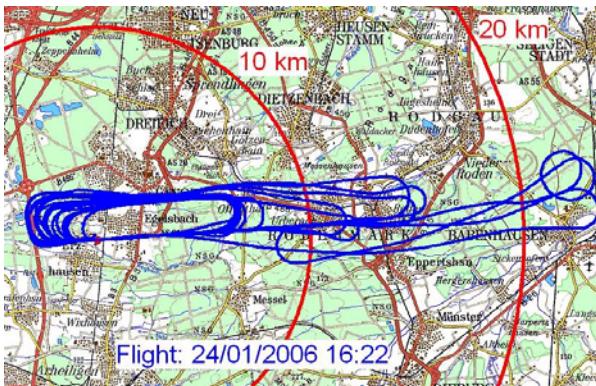
Am 23.01. und 24.01.2006 wurden insgesamt 50 Anflüge durchgeführt. Aufgrund der sehr schwierigen Luftraumsituation in der direkten Nachbarschaft vom Flughafen Frankfurt waren keine Standard- Anflüge (Anfangshöhe 2.000 bis 3.000 Fuß, Länge des Endanfluges ca. 18 km) möglich. Es durfte maximal 1.500 Fuß hoch geflogen werden. Dies führte zu einem Endanflug von knapp 8 km, bei dem sowohl auf dem Gleitpfad (Glideslope GS) als auch auf dem Leitstrahl (Localizer LLZ) geflogen werden konnte. Alle Anflüge, die in einer größeren Entfernung angefangen haben, wurden zunächst deutlich unterhalb des GS (und damit eigentlich unterhalb des geforderten Sendebereites der Bodenstation) geflogen.

Ebenfalls waren aufgrund der Nähe zur Kontrollzone vom Flughafen Frankfurt keine Anflüge auf die Landebahn 09 mit einem nennenswerten geradlinigen Endanflugteil möglich. Da aber während der Flugversuche östliche Windrichtungen vorherrschten, waren Anflüge auf die Landerichtung 27 nur während der weniger stark frequentierten Abendstunden möglich. Am 23.01. (erster Versuchstag) waren nur wenige andere Flugzeuge im An- oder Abflug auf Egelsbach unterwegs. Das Verfahren sah aufgrund der beschriebenen Gegebenheiten nun so aus, dass nach dem Anflug (passieren der Landebahnschwelle 27) in einem so genannten Procedure Turn Höhe gewonnen wurde und wieder Kurs Richtung Osten eingeschlagen wurde. In der gewünschten Entfernung (ca. 6 - 8 km Abstand von der Schwelle) wurde dann wieder auf den Endanflug eingekurvt (BILD 6).



**BILD 6:** GBAS Anflüge Egelsbach, Tag 1

Am zweiten Versuchstag (24.01.) waren zum Einen der Wind deutlich schwächer, aber zum anderen wesentlich mehr Flugzeuge in der Platzrunde. Um die Versuche trotzdem durchführen zu können, wurde von der Flugaufsicht die Landerichtung 27 für alle anfliegenden Flugzeuge vorgegeben. Somit wurde dann nach dem Überfliegen der Landebahnschwelle 27 die standardmäßig vorgesehene Nordplatzrunde geflogen (BILD 7).



**BILD 7: GBAS Anflüge Egelsbach, Tag 2**

Obwohl die Anflüge alles andere als optimal waren, konnten doch wichtige Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die GBAS- Installation bzw. das GBAS- Konzept des Institutes für Flugführung hat sich bewährt;
- Der RockwellCollins MMR GLU-925 hat auch unter hoch-dynamischen Manövern problemlos funktioniert;
- Die generierten Ablagen waren klar und eindeutig zu interpretieren;
- Die von der DFS geplanten Anflugverfahren und deren Implementierung in die GBAS- Bodenstation war erfolgreich.

Auf die detaillierte Datenauswertung wird im weiteren noch eingegangen.

### 2.3. Geplante Aktivitäten

Im Rahmen des GIFTaS-Projektes werden weitere Flugversuche im September 2006 in Toulouse stattfinden. Bei diesen Versuchen wird das Forschungsflugzeug mit zwei MMRs (in unterschiedlichen Versionen) der Firma Rockwell Collins ausgerüstet sein. Somit wird eine vergleichende Beobachtung dieser Geräte möglich werden. Auch wird eine zweite VDB-Empfangsantenne am Rumpfbug des Flugzeugs angebracht werden. Somit werden Betrachtungen hinsichtlich des Flugzeugeinflusses auf die Empfangsqualität möglich sein. Erste Ergebnisse werden auf der DGLR-Jahrestagung im Rahmen des Vortrages präsentiert.

Weiterhin ist geplant, leihweise eine russische GBAS- Bodenstation in Braunschweig auf zu bauen und zu befliegen. Auch diese Ergebnisse werden auf der Jahrestagung präsentiert werden.

## 3. DATENAUSWERTUNG / ERGEBNISSE

Die folgenden Kapitel befassen sich mit der Auswertung der Flugversuche sowie einer Darstellung der Auswertetools.

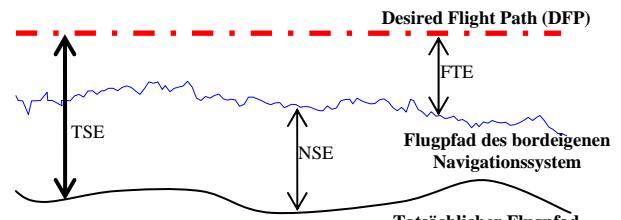
### 3.1. Nutzung von PEGASUS

Das Toolset PEGASUS wurde von EUROCONTROL entwickelt, um GNSS/SBAS/GBAS Daten auszuwerten. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf eine einfache Bedienbarkeit sowie die Möglichkeit gelegt. Außerdem sollte das Programm Paket durch einfache Modifikationen den sich ändernden Vorschriften angepasst werden können. Mit PEGASUS können die Leistungsdaten der satellitengestützten Anflugsysteme untersucht bzw. validiert werden.

### 3.2. Entwicklung institutseigener Software-Tools

Für die Auswertung der Performance werden in erster Linie 3 Fehlerkomponenten genutzt.

- Navigation System Error (NSE): Dieses Fehlerprofil gibt die Abweichung des Flugpfades, wie ihn das bordeigene Navigationssystem ermittelt hat, gegenüber dem tatsächlichen Flugpfad an.
- Flight Technical Error (FTE): Der FTE gibt die Abweichung des Flugpfades des bordeigenen Navigationssystems gegenüber dem vorgegebenen Flugpfad (Desired Flight Path - DFP) an.
- Total System Error (TSE): Der TSE gibt die Abweichung des tatsächlichen Flugpfades gegenüber dem Desired Flight Path wieder.



**BILD 8: Fehlerprofile**

Aus den Erläuterungen der Fehlerprofile ist klar ersichtlich, dass der NSE die Leistung des Navigationssystems an sich wiedergibt, während FTE und TSE bei manuell geflogenen Anflügen das Verhalten des Piloten mit widerspiegeln.

Zur Bestimmung dieser drei Fehlerprofile ist zunächst der hochpräzise tatsächliche Flugpfad erforderlich. Dafür wird eine nachträgliche Positionsbestimmung durchgeführt, die um mindestens eine Größenordnung genauer ist, als die erwartete Größenordnung der Fehlerprofile. Hierfür wird eine Position auf Basis einer Phasenlösung ermittelt. Voraussetzung ist, dass mit einer Referenzstation am Boden Korrekturdaten ermittelt werden, die zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten eingesetzt werden können. Zur Bestimmung der Phasenlösung gibt es diverse Software-Pakete

auf dem Markt. Das Institut für Flugführung hat ein eigenes Paket entwickelt, dass eben diese Positionsbestimmung auf Basis der Phasenlösung umsetzen kann. Der Vorteil hierbei ist der direkte Zugriff auf die verwendeten Algorithmen. Mit dem ermittelten tatsächlichen Flugpfad können dann problemlos die Fehlerprofile mit Hilfe von Matlab - Routinen bestimmt und dargestellt werden.

### 3.3. Auswertung der simulierten GBAS Anflüge

Bei der Auswertung der simulierten GBAS Anflüge wurde das PEGASUS-Toolset eingesetzt. Mit Hilfe dieses Toolsets konnte aus den mit den vier Referenzempfängern aufgezeichneten GPS - Daten ein GBAS Bodensegment simuliert werden. Die nachträglich generierten PEGASUS GBAS Messagetypen wurden in einem zweiten Schritt mit den aufgezeichneten Flugzeug - GPS - Daten verknüpft. Das PEGASUS-Toolset kann damit virtuell die Protection Levels für den jeweiligen Anflug sowie die bereits vorgestellten Fehlerprofile NSE, FTE und TSE bestimmen.

In einem weiteren Schritt wurden nun die vertikalen und lateralen Abweichungen des Flugzeugs vom Sollanflugpfad, die den Piloten angezeigt werden würden, in Übereinstimmung mit RTCA DO-253A Appendix C [1] berechnet. Die Geometrie des GBAS Anfluges wurde so gewählt, dass der (virtuelle) GBAS Anflugpfad genau dem tatsächlichen ILS Anflugpfad entsprochen hat. Dies wurde dadurch erreicht, dass die entsprechenden Weg-Punkte (FPAP, GARP, GPIP, TCP, LTP, GERP) bestimmt wurden (siehe BILD 9).

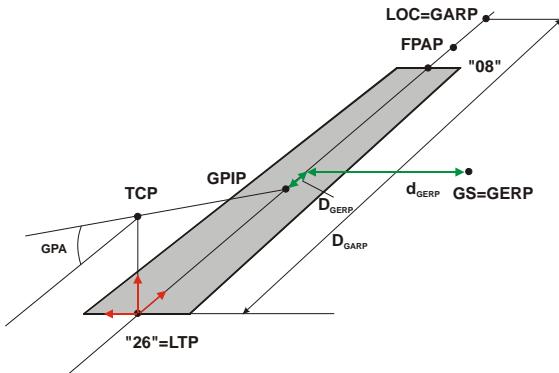


BILD 9: grafische Darstellung der GBAS Anfluggeometrie

Tabelle 1 beschreibt die angesprochenen Wegpunkte.

Abkürzung	Bezeichnung
FPAP	Flight Path Alignment Point
GARP	Glide Path Azimuth Reference Point
GERP	Glide Path Elevation Reference Point
GPIP	Glide Path Intercept Point
LTP	Landing Threshold Point
TCP	Threshold Crossing Point

TAB 2: Wegpunkte eines GBAS Anflugsegmentes

Damit konnten die berechneten Abweichungen mit den aufgezeichneten Abweichungen des standardmäßigen ILS Empfängers verglichen werden. Die Grafiken (BILD 10 und BILD 11) zeigen den Verlauf in DDM (Differences in Depth of Modulation) über der Entfernung zur Schwelle. Die dem Piloten angezeigten „Dots“ können mit Hilfe eines Faktors aus diesen DDM berechnet werden.

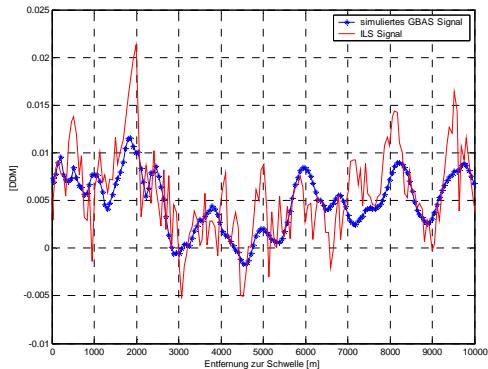


BILD 10: laterale Ablagen, Anflug Nr. 1

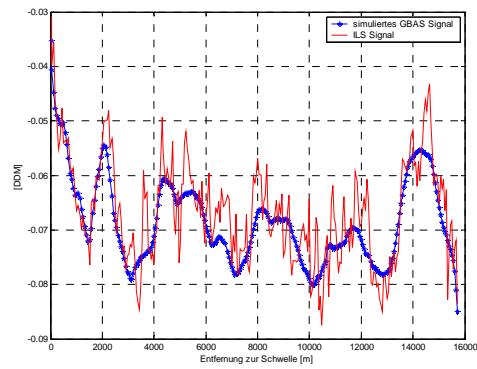
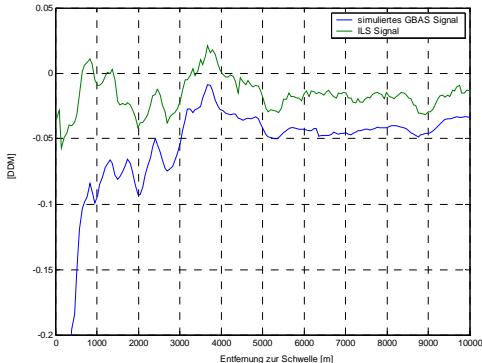


BILD 11: laterale Ablagen, Anflug Nr. 2

Sowohl die aufgezeichnete laterale Abweichung als auch die simulierte Abweichung stimmen sehr gut überein. Der einzige nennenswerte Unterschied ist das reduzierte Rauschen der GBAS - simulierten lateralen Abweichung. Hierbei muss erwähnt werden, dass das ILS Signal direkt analog aufgezeichnet wurde und somit keine

Rauschunterdrückung bzw. kein Tiefpass dazwischen geschalten war.

Der Verlauf der vertikalen Ablagen zeigt im ersten Ansatz einen nennenswerten Offset (BILD 12).



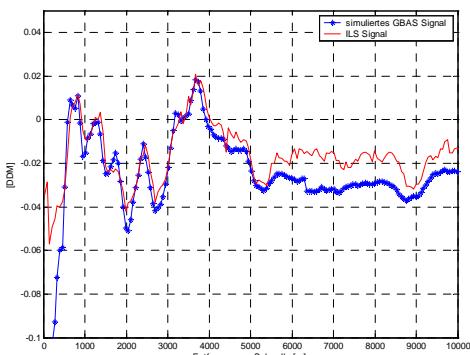
**BILD 12:** vertikale Ablage, Anflug Nr. 1

Eine mögliche Ursache für die Differenz der Ablagen liegt im Rechenalgorithmus für die Bestimmung der simulierten Ablagen begründet. Wenn man den Offset zwischen dem GPIP und GERP (BILD 9) berücksichtigt, ist es nahe liegend, dass die Gleichungen zur Berechnung der Ablagen um eben diese Distanz ergänzt werden müssen. Nur dann kann ein echter Overlay-Anflug erzielt werden, bei dem die Geometrie sowie die angezeigten Ablagen vergleichbar sind. Die Koordinaten des GERP müssten demnach wie folgt berechnet werden:

$$r_{GERP}^{ECEF} = r_{LTP}^{ECEF} + \left( \frac{TCH}{\tan(GPA)} + D_{GERP} \right) u_{rw} + d_{GERP} u_{lat}$$

Hierbei müssen die Parameter  $D_{GERP}$  und  $d_{GERP}$  auf die am jeweiligen Flughafen tatsächlich anzu treffende Werte gesetzt werden.

Nach einer Korrektur der simulierten GBAS Signale sind die folgenden Ergebnisse erzielt worden.



**BILD 13:** korrigierte vertikalen Ablagen

Die Abweichung in nächster Nähe zur Schwelle lassen sich damit erklären, dass das ILS Boden system ein paraboloidförmiges Abstrahlverhalten aufweist, während das GBAS System dieses durch einen Kegel nachbildet. Da das letzte Stück Anflug (nach der Entscheidungshöhe) bei CAT I Anflügen manuell geflogen wird, ist diese Abweichung nicht von Bedeutung.

Mit der Anpassung der Berechnung des GERP wurde eine gute Übereinstimmung der vertikalen Ablagen des Flugzeuges vom gewünschten Anflugpfad erzielt. Die Übereinstimmung ist notwendig, damit bei gemischten bzw. parallel eingesetzten ILS und GBAS Anflügen an ein und demselben Flugplatz die sonstige Infrastruktur (Anflugbeleuchtung, Landebahnmarkierungen etc.) für beide Anflugarten übereinstimmt. Es wird allerdings erwartet, dass die Notwendigkeit, die Gleichungen für den GERP zu modifizieren, nur bei Flughäfen auftritt, deren Größe und Landebahnausmaße nicht ICAO konform sind.

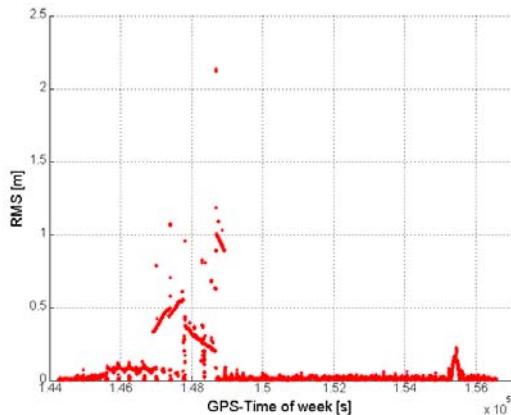
### 3.4. Auswertung der realen GBAS Anflüge

Bei der Datenauswertung der realen GBAS Anflüge in Egelsbach wurden zunächst die in 3.2 eingeführter Fehlerprofile NSE und FTE mit Hilfe des PEGASUS Softwarepaketes erstellt. Unabdingbare Voraussetzung für diese Fehlerprofile ist die Kenntnis über den tatsächlich geflogenen Flugweg. Die erwarteten Fehlerprofile liegen im Bereich zwischen 1 und 5 Meter. Damit muss die Bestimmung des aktuellen Flugpfades (AFP - Actual Flight Path) mindestens eine Größenordnung besser sein, d.h. im Bereich von kleiner als 10 cm liegen. Während der eigentlichen Flugversuche wurden mit einer Bodenstation GPS Referenzdaten am Flugplatz aufgezeichnet. Mit diesen Referenzdaten und der kommerziellen Software „Trimble Total Control“ (TTC®) wurde mit Hilfe einer Phasenlösungsbestimmung der hochgenaue AFP ermittelt. Das Gütekriterium für die Gültigkeit des AFP bestand darin, dass zum Einen die Software den Status „fixed carrier phase position solution“ für die einzelnen diskreten Positionspunkte ausgeben musste und dass zum Anderen der  $2\sigma$  Wert der RMS (quadratische Mittelwert) kleiner als 10 cm betragen musste.

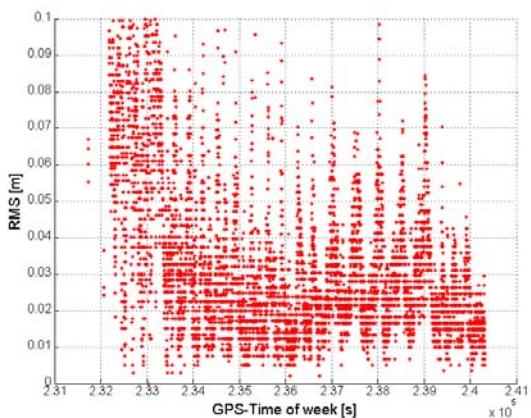
Für den ersten Tag konnten diese Vorgaben nicht erreicht werden (BILD 14). Auch am zweiten Tag wurden Datenpunkte von der Auswertung ausgeschlossen, bei denen der entsprechende RMS-Wert zu groß war. BILD 15 zeigt die verbliebenen Epochen.

Trotz intensiver Versuche, auch für den ersten Tag eine gute Phasenlösung für den AFP zu ermitteln, wurde dieses Ziel nicht erreicht. Erst ein Wechsel der Software zu GeoGenius® führte, bis

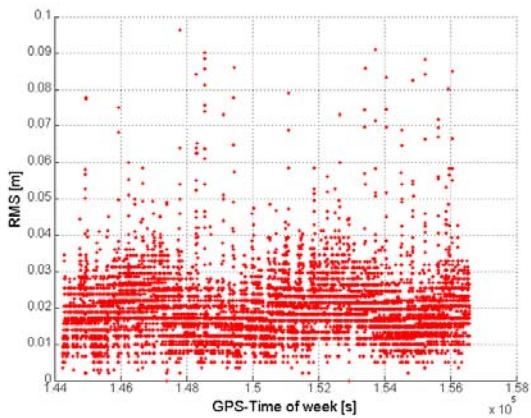
auf einzelne Ausreißer, zum gewünschten Ziel (BILD 16).



**BILD 14:** 2- $\sigma$  Wert Tag 1 (TTC®)



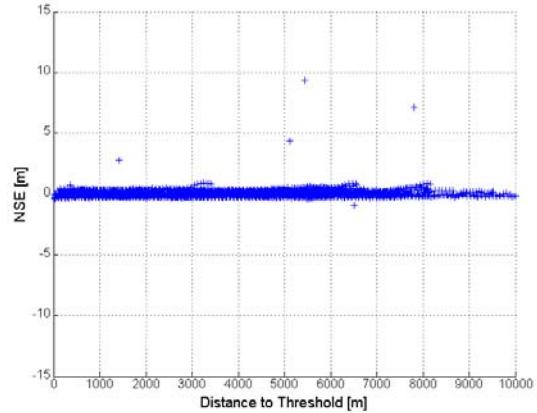
**BILD 15:** 2- $\sigma$  Wert Tag 2 (TTC®)



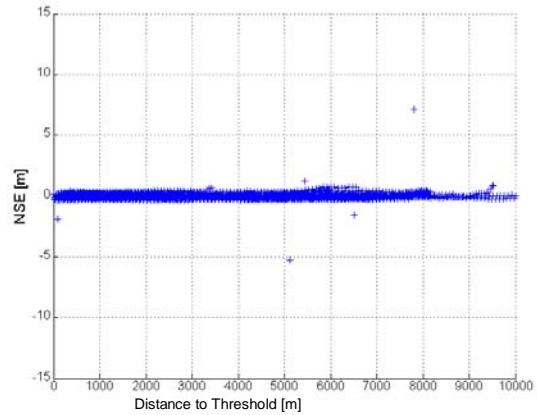
**BILD 16:** 2- $\sigma$  Wert Tag 1 (GeoGenius®)

Mit den somit ermittelten AFPs für beide Tage wurden nun die Fehlerprofile mit PEGASUS erstellt. Die Standarddarstellung ist, dass die Fehlerprofile in EAST, NORTH und DOWN angegeben werden. Bei den Anflügen auf Egelsbach (Landebahn 27) können hierbei die EAST-Profile als Fehler entlang des Flugpfades interpretiert

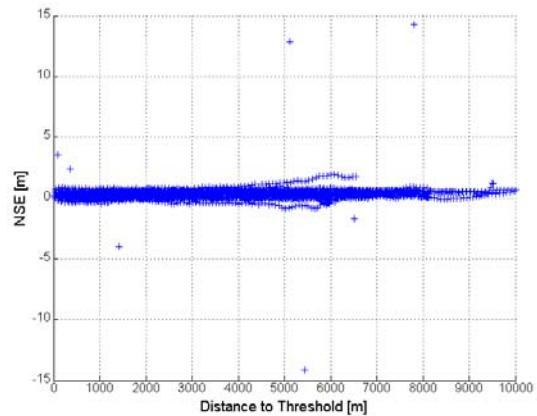
werden. Die NORTH-Profile geben den Fehler quer zum Anflugpfad an, während die DOWN-Profile die vertikalen Fehler zeigen. Aufgetragen wurden in BILD 17 bis BILD 19 die jeweiligen Fehler über der Distanz zur Schwelle.



**BILD 17:** NSE NORTH



**BILD 18:** NSE EAST



**BILD 19:** NSE DOWN

Die Bilder zeigen, dass trotz der schwierigen Messbedingungen die Ergebnisse den Erwartungen entsprechen. Die Fehlerprofile liegen bis auf wenige Ausreißer im Bereich von +/- 1 Meter.

Wie bereits beschrieben gab es diverse Probleme bei der Ermittlung des Referenz-Pfades. Die in den Diagrammen (BILD 17 bis BILD 19) zu findenden Ausreißer lassen sich ausnahmslos damit erklären, dass zu diesen Epochen kein gültiger Referenz-Pfad zur Verfügung stand.

Wie zuvor erklärt, zeigt der NSE den Unterschied zwischen der tatsächlichen und der vom Navigationssystem ermittelten Position an. Da dieser Wert bei realen Anflügen nicht zur Verfügung steht, wird ein sog. Protection Level ermittelt. Dieser bildet sich aus der Satellitengeometrie sowie vom Boden übermittelten Sicherheitsfaktoren und beschreibt eine Obergrenze des Positionsfehlers mit dem für CAT I notwendigen Vertrauen von maximal einem Fehler bei 10 Millionen Anflügen.

Long form	Meaning
Horizontal protection level (HPL)	Protection level in der Horizontalebene während der en-route Navigation
Lateral protection level (LPL)	Protection level in der Horizontalebene während eines Anfluges
Vertical protection level (VPL)	En-route: Protection level in der Vertikalebene, parallel zur Erdoberfläche Anflug: Protection level in der Vertikalebene, gekippt um den Anflugleitwinkel

TAB 3: Bedeutung der Protection Levels

TAB 3 zeigt detailliert die unterschiedlichen Definitionen der Protection Levels.

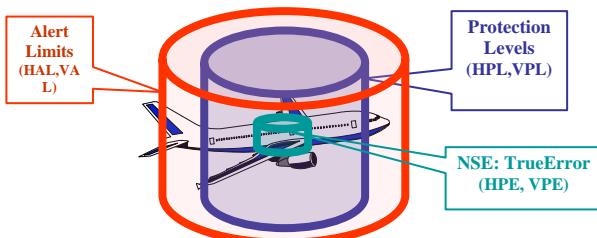


BILD 20: Vergleich NSE, H/VPL und H/VAL

BILD 20 zeigt den Zusammenhang zwischen den horizontalen und vertikalen Protection Levels, dem NSE sowie den Alert Limits. Die Alert Limits werden von der GBAS Bodenstation mit ausgestrahlt. BILD 21 zeigt die Alert Limits von Egelsbach.

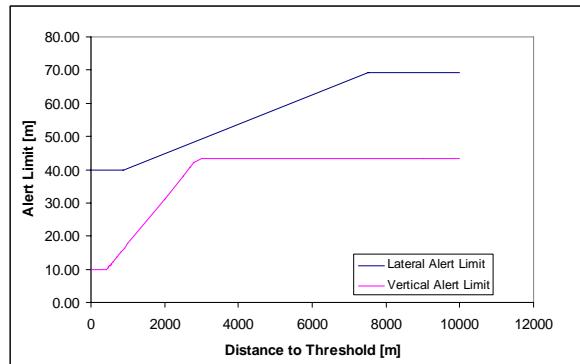


BILD 21: Alert Limits in Egelsbach

Die Auswertung der Anflüge hat gezeigt, dass in allen Anflügen die Anteile des NSE in horizontaler bzw. vertikaler Richtung sehr viel kleiner als die entsprechenden Protection Levels waren. BILD 22 zeigt beispielhaft einen Anflug (Anflug Nr. 13 vom ersten Tag).

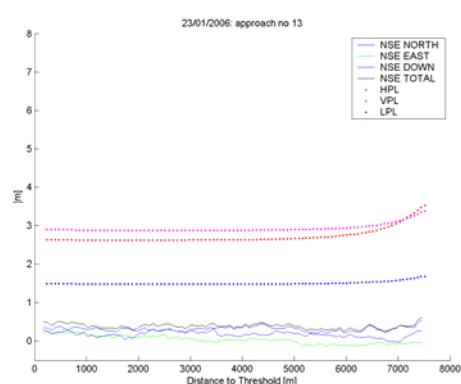


BILD 22: NSE und Protection Levels

Auch waren die Protection Levels alle kleiner als die Alert Limits. Somit waren trotz der ungünstigen Randbedingungen

- Große Entfernung zur GBAS-Station
- Vergleichsweise hochdynamische Flugmanöver

alle Anflüge gültig.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Institut für Flugführung der Technischen Universität Braunschweig hat sein Forschungsflugzeug Dornier Do 128-6 „D-IBUF“ für vielfältige Aufgaben auf dem Gebiet der Satellitennavigation ausgerüstet. Aktuell werden Präzisionsanflugverfahren mit Hilfe von GNSS bearbeitet. Hauptaugenmerk liegt dabei auf den sogenannten Ground Based Augmentation Systems (GBAS). Das Institut beschäftigt sich dabei sowohl mit der Datensammlung im Flugversuch als auch mit der nachgeschalteten Datenauswertung und -bewertung. Neben weiteren Flugversuchen im Rahmen des

Projektes „GIFTaS“ sind Flüge mit einer russischen GBAS-Bodenstation geplant. Für eine Weiterentwicklung der Anflugverfahren von den geradlinigen „ILS-Look-Alike“ Anflügen hin zu gekrümmten bzw. segmentierten Anflügen wird am Forschungsflughafen Braunschweig vom Institut für Flugführung des DLR eine GBAS-Bodenstation aufgebaut werden. Das Institut für Flugführung der TU Braunschweig ist hierbei als Partner bei der Spezifikation sowie der späteren Nutzung mit eingebunden.

## 5. DANKSAGUNGEN

Das Projekt „GIFTaS“ wurde von EUROCONTROL gefördert und gemeinsam mit PiLDo Labs (Barcelona) und IntegNav (Braunschweig) vom IFF bearbeitet. Die experimentellen GBAS-Anflugverfahren in Egelsbach wurden von der DFS GmbH erstellt. Für diese Unterstützung möchten wir uns ausdrücklich bedanken.

## 6. LITERATUR

- [1] Minimum Operational Performance Standards For GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA DO 253A, RTCA, November 2001
- [2] PEGASUS Interface Control Document