

# Das Europäische Satelliten-navigationsystem Galileo



Manuela Landrock, Christian Arbinger

## 1. Das Europäische Satellitennavigationsystem Galileo

*Galileo* – das ist nicht nur ein bedeutender Mathematiker und Physiker aus dem 17. Jahrhundert; es ist ebenfalls der Namensgeber für das globale satellitengestützte Navigations-system (Global Navigation Satellite System kurz GNSS) unter der Schirmherrschaft der Europäischen Kommission (EC) und der Europäischen Weltraumbehörde (ESA).

Mit Galileo wird ein weltweit operierendes Satellitennavigations-system entwickelt, welches sich im Gegensatz zum amerikanischen GPS oder russischen Glonass System ausschließlich unter ziviler Kontrolle befindet und Unabhängigkeit für Europa bedeutet. Doch dies allein ist nicht der einzige Vorteil von Galileo. Eine hochmoderne Satellitengeneration macht Galileo effizient, zuverlässig und ausfallsicher. In der heutigen Zeit nutzt nicht nur jeder dritte deutsche Autofahrer ein Navigationsgerät. Ebenso ist das Navigieren im Luftfahrtsektor und in der Schifffahrt ohne Satellitennavigation undenkbar. Auch Banken synchronisieren ihre internationalen Transaktionen präzise unter zu Hilfenahme der hochgenauen Satelliten-Systemzeit und in der Agrarindustrie wird mittels einer genauen Positionsbestimmung die Aussaat, das Düngen und die Ernte auf großen Feldern gesteuert. Jedes moderne Smartphone ist bereits heute mit GNSS Empfängern ausgerüstet und bietet somit ein breites Feld an Anwendungsmöglichkeiten für den Nutzer, von hilfreichen Informationen über nahe gelegene Einrichtungen wie Restaurants, Kinos oder Geschäfte bis hin zur Planung von Ausflügen. Auch im sicherheitsrelevanten Bereich zum Beispiel im Rettungs- und Polizeidienst ist die Nutzung einer hochgenauen Navigationstechnik für das Auffinden vermisster Personen oder das Koordinieren der Einsatzkräfte unabdingbar. Da Galileo ebenfalls mit dem weit verbreiteten GPS und Glonass voll kompatibel ist, werden die Anwender letztendlich von einer besseren Abdeckung sowie einer zuverlässigeren und genaueren Positionsbestimmung profitieren.

## 2. Die Komponenten von Galileo

Der Aufbau des Galileo Systems beruht auf drei wichtigen Bestandteilen. Dem Weltraumsegment, dem Bodensegment und natürlich dem Anwender des Systems. Das finale Galileo Weltraumsegment besteht aus insgesamt 30 Satelliten in einer stabilen Walker Konstellation. Das bedeutet, dass auf drei Umlaufbahnen jeweils zehn Satelliten in einer Höhe von ca. 23.222 Kilometer positioniert werden. Die Umlaufbahnen (oder auch Orbit genannt) sind um 120 Grad versetzt und pro Orbit werden zehn Satelliten platziert. Auf ihrer Umlaufbahn halten die Satelliten einen Abstand von circa 40 Grad und die Bahnneigung beträgt 56 Grad. Neun der zehn Satelliten werden operativ genutzt, während der zehnte Satellit als Ersatz im Falle eines Ausfalls bereit steht. Dies ermöglicht das Austauschen eines defekten Satelliten innerhalb kürzester Zeit und garantiert somit einen störungsfreien Betrieb ohne langes Warten auf einen nächsten Satellitenstart. Die Höhe der Umlaufbahn wurde bewusst gewählt, da in dieser Höhe ein stabiles Gravitationsfeld herrscht und atmosphärische Störungen gering sind. Dadurch sind Bahnkorrekturen nur sehr selten notwendig, dies wiederum spart Treibstoff für Notfälle. Des Weiteren ermöglicht die Höhe ebenfalls eine gute Abdeckung in Nordeuropa, der Polarregion und Städten mit vielen Hochhäusern. Für eine Umrundung der Erde benötigt der Satellit ca. 14,4 Stunden.

Die ersten vier operationellen Satelliten wurden von EADS Astrium gebaut, der Auftrag zum Bau weiterer 22 Satelliten wurde an die Firma OHB aus Bremen vergeben. Ein Galileo Satellit wiegt circa 700 Kilogramm und hat eine Treibstoffkapazität von ca. 50 bis 60 Kilogramm. Um Korrekturen durchzuführen oder Manöver zu fliegen, ist der Satellit mit dem sehr langlebigen Treibstoff Hydrazin ausgestattet. Die Abmessungen des Satellitenkörpers betragen 2,70 x 1,20 x 1,10 Meter. Die Spannweite der Solarflügel beträgt ca. 14,5 Meter und somit hat der Satellit eine verfügbare Leistung von ungefähr 1400 Watt. Die zu erwartende Lebensdauer liegt bei rund zwölf Jahren. An Bord des Satelliten befinden sich unter anderem eine Telekommunikationseinheit, Systeme zur Antriebs- und Lagerregelung sowie zur Kontrolle der Temperatur und Stromversorgung und mehrere Antennen zum Senden und Empfangen diverser Signale. Weiterhin sind zwei hoch präzise Atomuhren (Rubidium- und Wasserstoff-Maser Uhr) verbaut, die für die Generierung der hochpräzisen Systemzeit und der Navigationssignale verantwortlich sind.

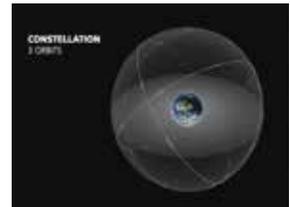


*Bild 1: Galileo IOV Satellit*

*Bildquellen: ESA*



*Bild 2: Die vollständige Konstellation*



*Bild 3: Die drei Umlaufbahnen*

Das Galileo Bodensegment besteht unter anderem aus einem weltweiten Netzwerk von Sende- und Empfangsstationen und einem globalen Datennetzwerk, welches alle Einrichtungen miteinander verbindet. Die Antennenstationen dienen unter anderem der Kommunikation mit den Satelliten (S-Band Antennen), der Erfassung der Galileo Signale (L-Band Antennen) und der Ausstrahlung der Galileo Navigationssignale (C-Band Antennen).



*Bild 4: Antennenstation Redu, Belgien  
Bildquelle: DLR GfR mbH*

Eine weitere wichtige Komponente des Bodensegments bilden die zwei Galileo Kontrollzentren mit Sitz in Oberpfaffenhofen, Deutschland und Fucino, Italien.

Das Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen wird von der DLR Gesellschaft für Raumfahrtanwendungen (GfR) mbH betrieben. Die DLR GfR mbH ist ein Unternehmen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt und betreibt seit dem Jahr 2008 das Galileo Kontrollzentrum auf dem DLR Campusgelände in Oberpfaffenhofen. Die Hauptaufgabe des DLR GfR Kontrollzentrums besteht unter anderem in der Überwachung, Steuerung und Kontrolle der Satelliten sowie der Planung der Kontaktaufnahme mit den Satelliten. Des Weiteren werden flugdynamische Maßnahmen und Orbitberechnungen durchgeführt, falls es erforderlich sein sollte, die Flugbahn des Satelliten zu korrigieren. Der Aufgabenbereich umfasst ebenfalls das Synchronisieren der Satelliten-Atomuhren, das Hochladen

der Navigationsinformationen sowie das Überwachen weltweit verteilter Antennenstationen. Während der vergangenen Jahre hat sich die DLR GfR mbH nicht nur umfassend auf den Start der Satelliten sondern auch auf den Routinebetrieb vorbereitet und den weiteren Systemaufbau unterstützt. Das Kontrollzentrum besticht durch sein futuristisches Design und den Sichtbeton mit den charakteristischen Löchern und wird den technischen Anforderungen des Galileo Programms im vollen Umfang gerecht. Ein Team von ca. 100 Ingenieuren und Technikern sorgt für einen störungsfreien Ablauf aller Operationen und gewährleistet eine extrem hohe Verfügbarkeit aller Systeme. Mit dem neuen Gebäudekomplex, der im April 2013 fertiggestellt wurde, erhält die DLR GfR mbH nun auch das technische Equipment zur Erzeugung und Verarbeitung der Navigationsdaten.



*Bild 5: Das Galileo Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen*



*Bild 6: Die Eingangshalle*



*Bild 7: Special Operations Kontrollraum  
Bildquellen 5 bis 8: DLR GfR mbH*



*Bild 8: Hauptkontrollraum*

Das zweite Kontrollzentrum mit Sitz in Fucino wird von Telespazio SpA betrieben. Beide Kontrollzentren werden redundant sein und können im Notfall innerhalb kürzester Zeit die Funktionen des jeweils anderen Kontrollzentrums übernehmen. Jedes Kontrollzentrum übernimmt Aufgaben im Bodenkontrollsegment (Ground Control Segment – GCS)

und im Bodenmissionssegment (Ground Mission Segment – GMS). Zum GCS zählen unter anderem die Steuerung und Überwachung der Satellitenkonstellation im Weltall. Unter dessen ist das GMS verantwortlich für die Verarbeitung der Navigationsdaten und somit für die Bereitstellung des Navigationssignals.

### **3. Projektphasen**

Nach dem EU Beschluss zum Aufbau des Galileo Systems im Jahre 1999, dem bereits einige Jahre Forschungs- und Entwicklungsarbeit vorangingen, wurden vier Projektphasen zur Umsetzung der Arbeiten festgelegt.

Ein wichtiger Meilenstein der ersten und sogenannten „Galileo System Testbed Phase“ bildeten der Start der zwei Testsatelliten GIOVE-A im Dezember 2005 und GIOVE-B im April 2008. Die Erkenntnisse die mit Hilfe der Testsatelliten gesammelt wurden, dienen der Erforschung neu eingesetzter Technologien und somit der Verbesserung der nachfolgenden Satellitengeneration und der gesamten Konstellation. So wurden unter anderem Strahlungseffekte im Orbit erforscht, Ionosphäreneffekte analysiert, die an Bord des Satelliten eingebauten Atomuhren und Signalsender getestet und das Bodensegment mit den Sensorstationen evaluiert. Nach Beendigung der ausgiebigen Testphasen wurden die Testsatelliten aus ihrer Umlaufbahn in einen höheren Orbit gehoben und somit außer Dienst gestellt. Für einen kontrollierten Absturz sind die Entfernung zur Erde zu weit und die Treibstoffreserven zu knapp.

Während der zweiten Projektphase der „In-Orbit Validation Phase“ wurden jeweils zwei erfolgreiche Doppelstarts im Oktober 2011 und 2012 durchgeführt und somit die ersten vier Satelliten der Gesamtkonstellation in ihren vorgesehenen Orbit transportiert. Des Weiteren wurde das Bodensegment weiter ausgebaut.

Die dritte Phase des Projektes die sogenannte „Full-Operational-Capability (FOC) Phase 1“ beinhaltet nun den weiteren Ausbau des Systems und den Start weiterer 14 Satelliten. Das globale Antennennetzwerk und das Bodensegment werden ebenfalls weiter ausgebaut. Mit Hilfe der insgesamt 18 Satelliten soll dann bereits die Bereitstellung erster Dienste erfolgen.

Die vierte und letzte „Full-Operational-Capability Phase 2“ wird dann den Vollausbau mit allen 30 Satelliten abdecken und dem Anwender die volle Funktionsfähigkeit des Systems garantieren. Der Vollausbau wird voraussichtlich im Jahr 2018 beendet sein.

Die Leitung der Phasen eins und zwei oblag der ESA während sich die EC an den Finanzierungskosten beteiligte. Die Phasen drei und vier werden nun von der EC verwaltet und finanziert, jedoch übernimmt die ESA weiterhin Design- und Beschaffungsaufgaben.

### **4. Premiere beim ersten Satellitenstart und die komplette IOV Konstellation**

Am 21. Oktober 2011 war es dann soweit. Nach intensiven Vorbereitungen und nur mit einer kleinen Verzögerung von knapp 24 Stunden starteten die ersten beiden Galileo IOV Satelliten auf ihre vorgesehene Umlaufbahn in eine Höhe von 23.222 Kilometern. Dies war

in vielerlei Hinsicht eine Premiere für alle Beteiligten. Denn das war nicht nur der Start der ersten beiden Galileo IOV Satelliten, sondern auch der erste Start der russischen Träger- rakete Soyuz vom europäischen Weltraumbahnhof in Kourou (Französisch-Guayana). Üb- licherweise erfolgen die Soyuz Raketenstarts von den russischen Weltraumbahnhöfen in Baikonur, Kasachstan oder Plessezsk, Russland. Eigens für die Soyuz Rakete wurde auf dem Gelände des Centre Spatial Guyanais in Kourou ein neuer Startkomplex inklusive Halle er- richtet, um alle Vorbereitungsarbeiten für den Raketenstart durchführen zu können und die Rakete vor Umwelteinflüssen und der hohen Luftfeuchtigkeit zu schützen. Ein mo- biles Startgerüst ermöglicht es dabei, dass die Rakete horizontal zusammengebaut und dann vertikal aufgestellt wird, sodass die Satelliten von oben auf die Aussetzvorrichtung montiert werden können. Die Nähe zum Äquator in Kourou erlaubt den Transport einer höheren Nutzlast in den Weltraum, da die Rotationsenergie der Erde am Äquator am höchsten ist. Diese Energie nutzt die Rakete aus, um ihre Geschwindigkeit zu erreichen und somit steht mehr Treibstoff für den Transport höherer Nutzlasten oder das Zurück- legen weiterer Entfernungen zur Verfügung. Während von den russischen Startplätzen nur ca. 1,5 Tonnen Nutzlast in den Orbit transportiert werden können, ermöglicht ein Start von Kourou den Transport von ca. 2,7 Tonnen Nutzlast. Die Soyuz Rakete, die für den Start der Galileo Satelliten verwendet wird, verfügt über drei Brennstufen und die wie- derzündbare Oberstufe „Fregat-MT“. Diese setzt die Satelliten in den für sie vorgesehenen Orbit ab. Vom Start bis zum Aussetzen der Satelliten vergehen ungefähr drei Stunden und 45 Minuten.



*Bild 9: Start der Soyuz Rakete*



*Bild 10: Die Soyuz Rakete auf ihrem Startplatz in Kourou*



*Bild 11: Die Galileo Satelliten auf der Haltevorrichtung der Oberstufe Fregat*



*Bild 12: Abtrennung der Oberstufe Fregat von Haltevorrichtung mit den befestigten Galileo Satelliten*

*Bildquellen 9 bis 12: ESA*

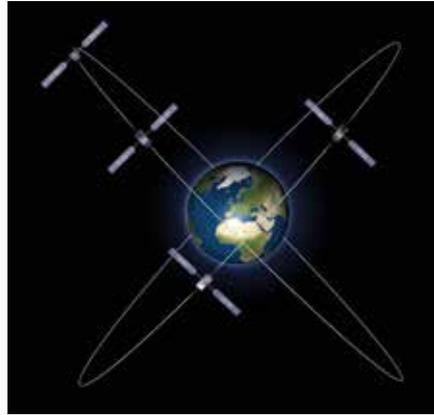
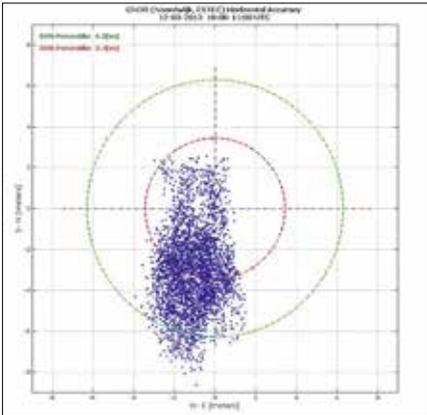
Um 7:31 Uhr Ortszeit in Kourou startete die erste Soyuz Rakete trotz Regen mit ihrer wertvollen Fracht an Bord am 21. Oktober 2011 ins All. Doch dies war nur der erste Meilenstein. Nach dem Aussetzen der Satelliten erhielt das Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen gegen 16:30 Uhr Ortszeit dann die freudige Nachricht, dass die Satelliten erste „Lebenszeichen“ gesendet haben. Somit beginnt eine intensive Testphase, während der alle Subsysteme des Satelliten auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft werden.

Die sogenannte „Launch and Early Operations Phase“ (kurz LEOP) deckt den Zeitraum vom Satellitenstart bis zur Übergabe der Satellitenkontrolle an das operierende Kontrollzentrum. Während LEOP werden unter anderem die Solarflügel der Satelliten ausgefahren und erste Satellitensystemtests durchgeführt. Diese Phase dauert in der Regel ungefähr eine Woche und sämtliche Arbeiten werden von den LEOP Kontrollzentren in Toulouse (betrieben von der französischen Raumfahrtagentur CNES) und dem European Space Operations Centre „ESOC“ in Darmstadt (betrieben von der ESA) durchgeführt.

Am 2. und 3. November 2011 wurde dann die Kontrolle jeweils eines Satelliten an das Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen übergeben. Dies wird als „Command and Control Handover“ bezeichnet. Von nun an betreuen das DLR GfR Team die Satelliten rund um die Uhr und führen in den nächsten drei Monaten intensive Tests mit den Satelliten durch. Doch zunächst einmal werden die Satelliten in ihre genaue Position gebracht (Fine Positioning). Die Oberstufe der Rakete hat die Satelliten zwar in der richtigen Höhe ausgesetzt, aber die Satelliten müssen im richtigen Winkel zur Erde ausgerichtet werden, damit sie ihre spätere Funktion erfüllen können. Dazu bedarf es mehrerer Manöver, in denen die Steuerröhrchen des Satelliten jeweils nur für ein paar Sekunden gezündet werden. Den Manövern sind umfangreiche Bahnberechnungen vorangegangen, sodass der Satellit sehr genau an der für ihn vorgesehenen Position platziert werden kann. Weiterhin werden alle Subsysteme, zum Beispiel die Energieversorgung sowie die Antriebs- und Lageregelung, auf ihre volle Funktionsfähigkeit getestet. Alle Systeme sind redundant ausgelegt, sodass im Notfall sofort auf das funktionierende System gewechselt werden kann. Wichtige Meilensteine dieser ausgiebigen Testphase sind weiterhin das Anschalten der Uhren sowie die Aktivierung der Payload. Während des Testzeitraums wird auch in Zusammenarbeit mit der Bodenstation in Redu, Belgien die Übertragung und die Qualität der Navigations- und Telemetriesignale getestet. Dazu ist die Bodenstation unter anderem mit einer L-Band Antenne ausgerüstet, die in der Lage ist, die Navigationssignale des Satelliten zu empfangen. Nach dem erfolgreichen Ende der Testläufe werden die Satelliten weiterhin 24 Stunden am Tag überwacht und im Routinebetrieb geflogen.

Fast genau ein Jahr nach dem ersten erfolgreichen Launch startete am 12. Oktober 2012 erneut eine Soyuz Trägerrakete mit den nächsten zwei Galileo IOV Satelliten an Bord. Somit war die IOV Konstellation komplett und nach Beendigung der Testläufe konnten dann erstmals „echte Navigations-signale“ berechnet werden. Es bedarf mindestens vier Satelliten um eine genaue Positionsbestimmung vorzunehmen. Diesmal erfolgte der Start um 15:15 Uhr Ortszeit in Kourou beim strahlenden Sonnenschein und wieder beobachtete das DLR GfR Team im Kontrollzentrum Oberpfaffenhofen mit angehaltenem Atem den Bil-

derbuchstart. Nicht ganz vier Stunden später und gegen Mitternacht in Oberpfaffenhofen war es dann soweit: Die Satelliten wurden erfolgreich im Orbit abgesetzt. Auch diesmal übernahmen abermals die LEOP Kontrollzentren in Toulouse und Darmstadt die Kontrolle über die Satelliten während der ersten Tage im All. Am 21. Oktober 2012 und somit genau ein Jahr nach dem ersten Start übernahm das Team in Oberpfaffenhofen die Kontrolle über den dritten Satelliten. Einen Tag später folgte der vierte Satellit. Erneut begannen die umfangreichen Testphasen mit den Satelliten, die am 12. März 2013 in der „Galileo First Position only“ gipfelten. An diesem Tag wurde erstmals eine genaue Positionsbestimmung mittels der vier Galileosateliten durchgeführt.



*Bild 13: Galileo First Position Only*  
*Bildquellen 13 bis 14: ESA*

*Bild 14: Die komplette IOV Konstellation*

Doch mit diesem großen Erfolg stehen die Arbeiten im Kontrollzentrum Oberpfaffenhofen nicht still, denn schon laufen die Vorbereitungen für den nächsten Start. Geplant ist dieser für das erste Quartal 2014 und diesmal mit einer neuen Satellitengeneration gebaut von der Firma OHB in Bremen. Die Aufgaben im Kontrollzentrum während dieser Phase reichen von der Entwicklung und Validierung neuer Flug- und Kommandoprozeduren, über die Pflege von Datenbanken, dem Training des Teams, der Simulationen sämtlicher Szenarien bis hin zur Begleitung und Durchführung von Systemtestkampagnen. Während dieser Testkampagnen haben die Ingenieure bereits die Chance den Satelliten zu kommandieren und sein Verhalten zu testen. Zu diesem Zweck befindet sich der Satellit in speziellen Testräumen (zum Beispiel einem Reinraum) des Satellitenherstellers, sodass die Ergebnisse solcher Testläufe noch vor dem Start umgesetzt werden können. Es werden unter anderem Strahlungs-, Schwingungs- und Thermaltests mit dem Satelliten durchgeführt. Weiterhin werden sämtliche Schnittstellen, zum Beispiel zwischen den Kontrollzentren oder zu den Bodenstationen, auf ihre volle Funktionsfähigkeit getestet.

## 5. Die Zukunft – Die Galileo Dienste

In der Zukunft wird Galileo seinen Nutzern unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten und Services bieten. Das Angebot soll die folgenden fünf verschiedenen Dienste umfassen: Open Service, Public Regulated Service, Commercial Service, Search and Rescue Service und Safety of Life Service. Der Open Service (oder auch Offener Dienst) wird kostenlos zur Verfügung gestellt und bietet dem Anwender eine verbesserte und hochgenaue Satellitennavigation für eine Vielzahl von Anwendungen. Der Public Regulated Service (oder auch Öffentlich regulierter Dienst) ist ein verschlüsselter Service mit kontrolliertem Zugang, der nur bestimmten Nutzergruppen zum Beispiel staatlichen Institutionen zugänglich gemacht wird und durch eine höhere Verfügbarkeit gekennzeichnet ist. Der Commercial Service zeichnet sich durch seine hohe Genauigkeit und seinen garantierten Service aus und wird vor allem für professionelle Nutzer von Interesse sein und spezielle Anwendungsmöglichkeiten bieten. Der Search and Rescue Service (auch Such- und Rettungsdienst) dient dazu, Menschen in Not zum Beispiel in Seenot oder abgestürzte Wanderer zu lokalisieren. Diese bekommen dann die Rückmeldung, dass ihr Signal bei der entsprechenden Rettungsstelle eingegangen und Hilfe somit unterwegs ist. Dieser Dienst bietet eine hochgenaue Positionsbestimmung, um die Opfer ausfindig zu machen. Der Safety of Life Service ist ein sicherheitskritischer Dienst, der das Navigationssignal verifiziert und Informationen über die Genauigkeit des Signals liefert. Dieser Dienst findet beispielsweise in der Luftfahrt Anwendung, wo ein Ausfall oder ein ungenaues Signal Menschenleben kosten kann.

Wie bereits zuvor erwähnt, wird es möglich sein, einen eingeschränkten Open Service mit nur 18 Satelliten anzubieten. Nach der Beendigung des Vollausbaus werden alle Dienste uneingeschränkt zur Verfügung stehen.

Mit Galileo etabliert sich eine neue, moderne, effiziente und hochgenaue Generation der Satellitennavigation. Die ständig steigenden Anforderungen und Anwendungsmöglichkeiten kann ein System allein nicht erfüllen und Europa schafft sich mit Galileo ein kleines Stück Unabhängigkeit. Die Arbeiten im Galileo Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen werden weiter vorangehen und das Team der DLR GfR mbH blickt gespannt und motiviert auf die nächsten Meilensteine des Systemaufbaus und des Betriebes entgegen.

*Disclaimer: Die beschriebenen Tätigkeiten werden im Rahmen des EU GNSS Programms unter einer Beauftragung der Spaceopal GmbH durchgeführt. Die Meinungen, die in diesem Artikel wiedergegeben werden, spiegeln in keiner Weise die offizielle Meinung der EU oder der ESA wider.*