

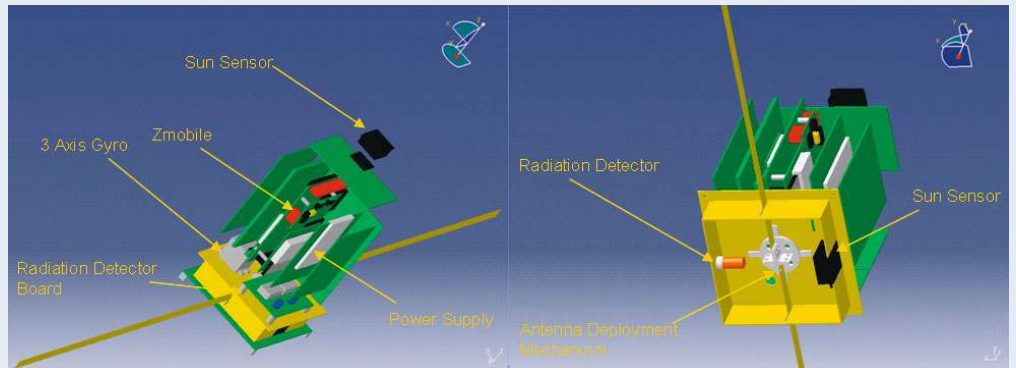
Das Flugsteuerungssystem eines neuartigen Nanosatelliten nutzt grafische Systemprogrammierung mit NI LabVIEW Embedded auf der Low-Power-ADI-Blackfin-Processor-Plattform ZMobile für präzise Ausrichtung im Orbit.



Der grafisch programmierte, 3-Achsen-stabilisierte Nanosatellit mit Solarzellen und ausgesetzten Antennen.

# Graphical Embedded Design in Raumfahrtanwendungen

Der Miniatursatellit «PurdueSat» ist als Nanosatellit eingestuft und wird gegenwärtig von der Universität für Luft- und Raumfahrt in Purdue, USA, entwickelt. Speziell an PurdueSat ist seine Fähigkeit, sich autonom und ohne klassische Triebwerke räumlich neu auszurichten. Die Lösung ist insofern einzigartig, als sie nur auf der Wechselwirkung zwischen dem vom Satelliten erzeugten magnetischen Moment und dem Magnetfeld der Erde beruht. Das erfordert hochkomplexe mathematische Modelle und enorme numerische Datenverarbeitung zur Laufzeit. Daher waren hohe Rechenleistung zusammen mit einem Low-Power Energieschema die Schlüsselanforderungen bei der



3D-Computermodelle des gesamten Nanosatelliten dienen zur Begrenzung des Massenmittelpunktes auf einen Bereich von 2 cm vom geometrischen Mittelpunkt.

Auswahl der Steuerungsplattform. Dieser Artikel stellt vor, wie dieses Problem mit LabVIEW Embedded auf einem Blackfin Prozessor Zielsystem gelöst wurde.

### Die Mission

Das CubeSat-Projekt von Purdue vernetzt Know-how und Ergebnisse, welche in mehrjähriger interdisziplinärer und internationaler Teamwork erarbeitet wurden. Neben der primären Aufgabe präziser Lageregelung hat der PurdueSat die wissenschaftliche Mission, die von verschiedenen solaren Ereignissen verursachte Strahlungsaktivität im Weltraum zu messen. Das wird für etwa 1 Jahr in der unteren polarnahen Umlaufbahn der Erde

in einer Höhe von 700 km bei einer Umlaufzeit von 90-110 Minuten erfolgen. Der Satellitenaufbau stellt nach CubeSat-Standards einen Doppelwürfel mit Seitenflächen von nur 10 cm x 10 cm x 20 cm und maximal 2 kg Bruttomasse dar. Er entspricht dem CubeSat-Formfaktor, der zur standardisierten Schnittstelle eines Verteilraumschiffs festgelegt wurde, um die Startkosten auf ein Minimum zu senken.

### Limitierte Energie

Eine präzise und autonome Steuerung der Fluglage stellte schon immer eine Herausforderung an Satelliten der CubeSat-Klasse dar. Was bis anhin gefehlt hat, waren

### Autor

Marco Schmid  
Schmid Engineering AG, Schweiz  
Prof. David Filmer, Paul Moonjelly  
School of Aeronautics & Astronautics, Purdue University, USA



### Infos

Schmid Engineering AG  
9542 Münchwilen  
071 969 35 90  
marco@schmid-engineering.ch  
www.schmid-engineering.ch/

kompakte, leistungsfähige HW/SW-Plattformen mit grossem Energiewirkungsgrad, welche gleichzeitig mit den sparsamen Energiebudgets von Nanosatelliten vereinbar sind.

«Das ZMobile Mixed Signal Board auf der Basis von LabVIEW Embedded und des Blackfin Prozessors stellt eine vielversprechende Systemplattform für anspruchsvolle Anwendungen in der Welt der Nanosatelliten dar, denn es verbindet ein Low-Power-Energieschema mit hoher Rechenleistung. Ausserdem wird dank grafischer Programmierung DSP-Leistung für Raumfahrt-Ingenieure zugänglich, die jetzt nicht mehr gleichzeitig Experten für Embedded Systeme zu sein brauchen», stellt Paul Moonjelly, Projektleiter und Systemingenieur für das Purdue CubeSat Programm, fest.

### Technologiesprung

Der Schwerpunkt des PurdueSat-Projektes liegt auf der Verifizierung einer neuartigen Weltraumtechnologie, die für zukünftige CubeSat-Missionen wiederverwendbar ist. Zur Realisierung des Flugsteuerungssystem hat sich Purdue für die Low-Power-Mixed-Signalplattform «ZMobile» entschieden, die auf dem NI LabVIEW Embedded Modul und ADI Blackfin-Prozessoren basiert. Diese Lösung bietet eine benutzerfreundliche, energiesparende und leistungsstarke Embedded-Berechnungsplattform, passend zum winzigen Formfaktor des

CubeSat. Sie gibt Raumfahrt-Ingenieuren die Möglichkeit, das Potenzial eines leistungsfähigen Digitalen Signalprozessors (DSP) zu nutzen, ohne mit Details von Low-Level-Software und -Hardware konfrontiert zu werden.

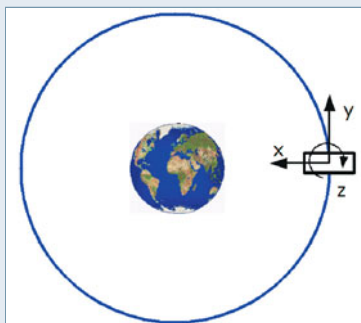
Der DSP in Kombination mit einer höheren grafischen Programmiersprache stellt den Ingenieuren und Wissenschaftlern eine Technologie zur Verfügung, um mathematisch hochkomplexe Modelle direkt auf einer Embedded-Plattform zu implementieren. Dank vertrauten Blockdiagrammen haben die Domain-Experten von Purdue stets eine intuitive Sicht auf das Gesamtsystem. Nach dem Projektleiter von PurdueSat werden dadurch auch in Verbindung mit grafischem Fast Debugging Mode (FDM) von Schmid Engineering Lernkurven verkürzt, Programmierungs- und Debugging-Zyklen um Faktoren beschleunigt und die Systemwartung vereinfacht.

### Systemübersicht

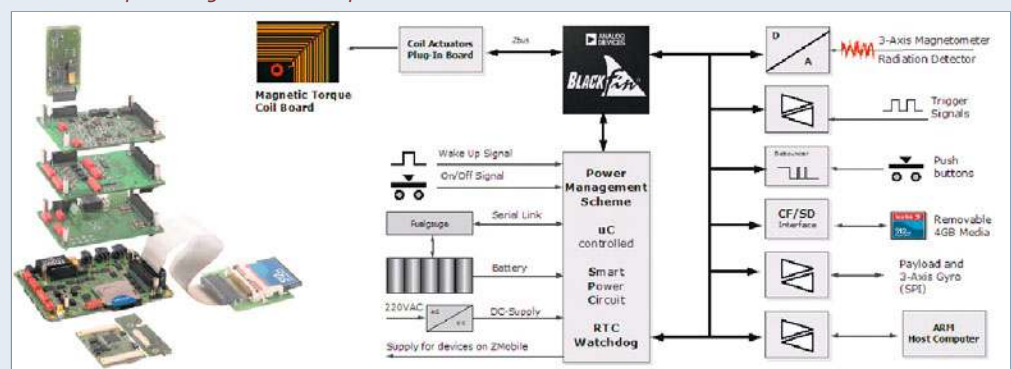
Das Flugsteuerungssystem besteht aus 6 Subsystemen: Lagebestimmungssystem, Lagesteuerungssystem, Wissenschaftliche Nutzlast, Kommunikationssystem, Energiesubsystem und Flugberechnungssystem.

Das **Lagebestimmungssystem** ist für die Messung und Berechnung der räumlichen Satellitenausrichtung verantwortlich. Es verwendet dazu einen Magnetometer und ei-

*Nadir-Ausrichtung (zur Erde zeigend) für die Orientierung des Raumfahrzeuges zur Gewährleistung stabiler Kommunikationen mit der Bodenstation.*



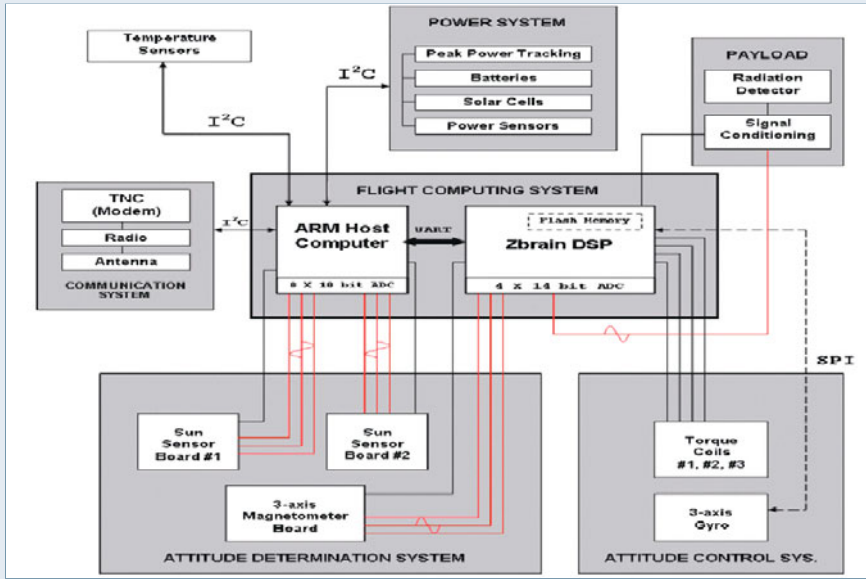
*Hard- und Softwarearchitektur der grafisch programmierbaren Mixed-Signalplattform und das kompakte Plug-In-Stack-Konzept des ZMobile.*



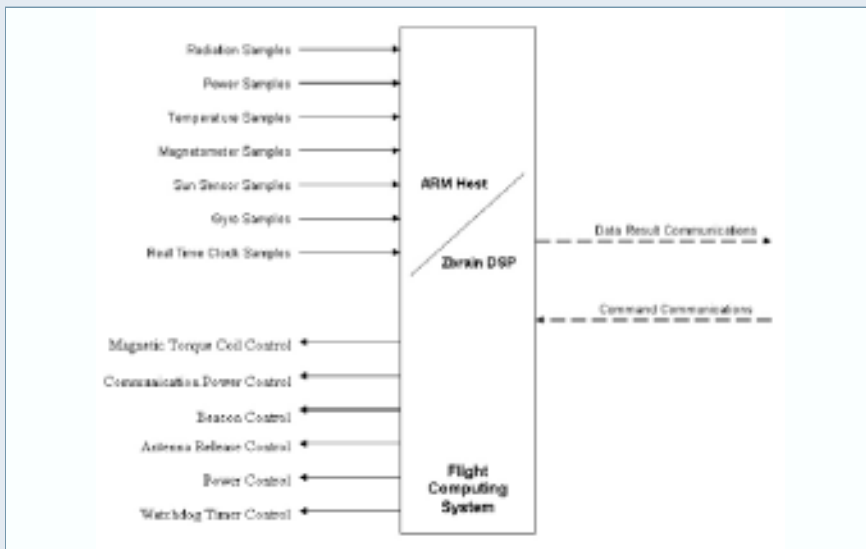
*PurdueSat soll Mitte 2008 mit einer russischen Dnepr-Rakete, hier bei einem Start in Baykanur, in das All befördert werden. (Bild: AMSAT)*

nen Sonnensensor. Diese Inputs werden über rechenintensive Schätzalgorithmen verarbeitet, woraus anschliessend die Fluglagedaten gewonnen werden.

Das **Lagesteuerungssystem** befasst sich mit der Lagepositionierung. Dabei erzeugen elektromagnetische Spulen in regelmässigen Abständen Magnetfelder längs der 3 Achsen, abhängig von den Resultaten des Regelalgorithmus. Das Ziel ist, den Satelliten so auszurichten, dass seine Antennen immer direkt zur Erde zeigen. In diesem sogenannten Nadir-Pointing-Modus ist die Kommunikationsverbindung zur Bodenstation am robustesten



Architektur des gesamten Flugsystems des PurdueSat.



Softwareanforderungen des Flugsteuersystems, unterteilt nach Input, Output und Kommunikationshandlungen, die periodisch und autonom durchgeführt werden.

gegenüber Störeinflüssen. Das **Kommunikationssystem** ist für die Übertragung von Daten und Befehlen von und zu der Bodenstation zuständig. Das Subsystem **Wissenschaftliche Nutzlast** besteht hauptsächlich aus einem Strahlungsdetektor, der die Strahlungspegel in der unteren Erdumlaufbahn erfasst und die Daten speichert, wann immer Radioaktivität festgestellt wird. Schliesslich versorgt ein intelligentes **Energiesystem** alle Bordsubsysteme mit Strom. Es stellt die Energiequelle für den gesamten Satelliten

dar. Solarzellen, die ungefähr 3W Durchschnittsleistung erbringen, nutzen Solarenergie und speichern diese in Bordakkus (1,25 Ah @ 8,4 V). Der Satellit befindet sich für etwa 70% der Orbitzeit im Sonnenlicht. In der Dunkelphase muss er vollständig von den Akkus betrieben werden. Sein Funktionalitätsgrad ist damit einerseits vom Standort auf der Umlaufbahn und andererseits von der Ladung und dem Gesundheitszustand der Batterien abhängig. Gleichzeitig spielt die Verfassung der Solarpanels eine zentrale Rolle, da sich die Solar-

zellen durch die Weltraumstrahlung progressiv zersetzen. Entsprechende Modelle und dynamische Regelung von Taktfrequenz und Versorgungsspannung des DSP sind wichtige Komponenten im Powermanagementkonzept des Satelliten.

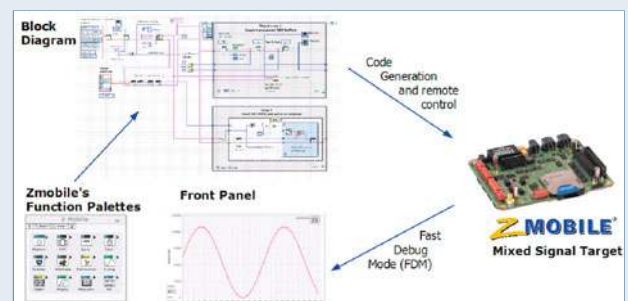
### Dual-Core-Architektur

Das Flugberechnungssystem ist für die Ausführung aller entscheidenden Operationen verantwortlich, einschliesslich Steuerung der Bordhardwaregeräte, Zeitmanagement von Operationen und Ausführung mathematisch intensiver Regelalgorithmen, Datenpflege für die Mission und Kommunikationen mit der Bodenstation. Um den Energieverbrauch so niedrig wie möglich zu halten, wurde eine Dual-CPU-Architektur gewählt. Ein 60 MHz ARM Low Power Microcontroller bleibt die gesamte Zeit über in Betrieb und sendet Wecksignale an den digitalen Signalprozessor, wann immer sein Service verlangt wird. Die Datenpflege wird hauptsächlich vom ARM abgewickelt, während die komplexen numerischen Verarbeitungsaufgaben wie Lagebestimmung und -regelung durch den 500 MHz ZMobile DSP ausgeführt werden.

### Schweizer Know-how

Schmid Engineering, ein Schweizer Lösungsanbieter für Embedded Systems auf der Basis von LabVIEW Embedded auf Mikroprozessoren, arbeitet mit Purdue bei der Entwicklung und Implementierung der Flugberechnungs-Systemsoftware zusammen. Als Teil des ge-

LabVIEW Virtual Instruments (VIs) als gebrauchsfertige Blackbox Icons für typische embedded DSP- und Mikrocontroller-Funktionen.



meinsamen Projekts wird ein zu-verlässiges Echtzeit-Konzept entwickelt, das für langfristige Anwendungen im Weltraum geeignet ist. Dabei handelt es sich hauptsächlich um ein intelligentes Energieschema und sichere Fehlererkennung und -selbstbehebung. Die Firma Schmid Engineering bringt Wissen ein, das sie bei einem erfolgreich installierten Tiefsee-Überwachungssystem erworben hat, welches auf der gleichen Technologie beruht (siehe MegaLink Precision 8-2007).

### Lagesteuerung

Das Lagebestimmungssystem nutzt mehrfache Sensorinputs zur Bestimmung der Satellitenorientierung im dreidimensionalen Raum. Ein Sonnensensor, im Grunde genommen das «Auge» des Satelliten, misst den Vektor vom Satelliten zum Sonnenmittelpunkt. Parallel dazu misst ein 3-Achsen-Magnetometer den räumlichen Vektor des Erdmagnetfeldes an der aktuellen Position auf der Umlaufbahn. Die zwei noch fehlenden Informationen werden von zeitkontinuierlichen mathematischen Modellen berechnet – eines für die Trägheitslage der Sonne und ein zweites für das erwartete lokale geomagnetische Feld, betrachtet von einem Trägheitsbeobachter. Die beiden Vektoren der Sensormessungen und die beiden Trägheitsvektoren der mathematischen Modelle werden schliesslich über rechenintensive Schätzalgorithmen in Echtzeit verarbeitet. Die exakte Orientierung des Satelliten im Orbitrahmen wird mit einer deterministischen Update-Rate von 1 Hz bestimmt.

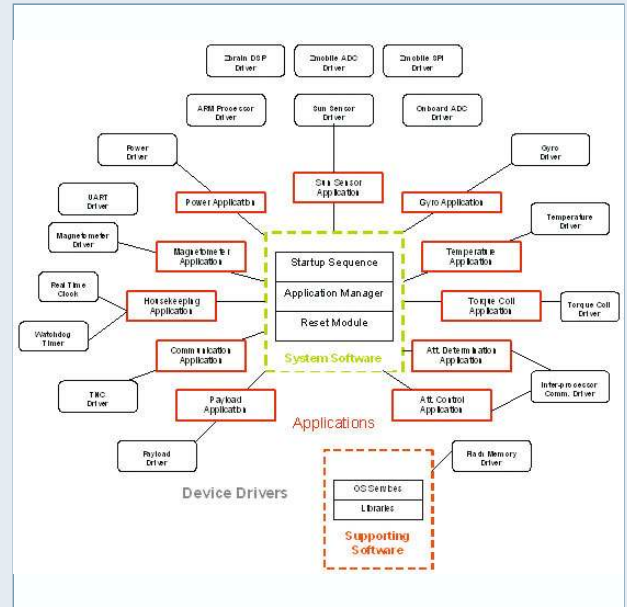
Das Lagesteuerungssystem für stabile Satellitenorientierung stellt gleichzeitig das wichtigste Ziel der Purdue CubeSat-Mission dar, da die Kommunikationsantennen jederzeit genau zur Erde zeigen müssen. Elektromagnetische Planarspulen längs der räumlichen Achsen des Satelliten feuern in regelmässigen Abständen, um eine magnetische Wechselwirkung zwischen dem Umfeld des Satelliten

und der Erde zu erzeugen. Mit dem erzeugten Drehmoment wird versucht, den Satelliten auf neue Lagewinkel auszurichten, gleich einer Kompassnadel, die sich nach dem Magnetfeld der Erde ausrichtet. Dank verfügbarer Sollenergie von rund 0,3 W können die Spulen von schätzungsweise ca. 0,1 Am erzeugen. Nach Wertz liegt die Stärke des Magnetfeldes der Erde in der polarnahen Umlaufbahn im Grössenbereich von 0,5 Gauss (5000 nT).

Der Drehmomentvektor ist das Kreuzprodukt aus dem geomagnetischen Feld der Erde und dem vom Satelliten selber erzeugten Magnetmoment. Daher wird seine Grössenordnung im Bereich weniger  $\mu\text{Nm}$  liegen. Das genügt, um den Nanosatelliten neu zu positionieren, denn der Wert übersteigt deutlich die erwarteten Stördrehmomente wie Luftwiderstand und solarer Strahlungsdruck. Der Regelalgorithmus ermittelt zuerst die Istlage und berechnet dann den Vektor des magnetischen Moments, um den Satelliten in die Sollposition zu drehen. Die Komponenten dieses Momentvektors längs der X-, Y- und Z-Achse werden über die mittels PWM-Signalen angesteuerten Spulen generiert. Der Steuerungsalgorithmus hat sich also mit vielfachen Inputs und Outputs eines nichtlinearen Systems in Echtzeit zu befassen, wodurch hohe rechnerische Anforderungen, Echtzeit-Deterministik und Multitaskingfähigkeit an ihn gestellt werden.

### Fazit

Der CubeSat von Purdue ist in der Lage, eine präzise Bestimmung der Fluglage und eine exakte Lageregelung allein unter Verwendung elektromagnetischer Spulen zu realisieren. Grafische Embedded System Programmierung hat das Design und die Entwicklung von PurdueSat, die von einer kleinen Gruppe von Raumfahrtingenieuren von Purdue durchgeführt wird, wesentlich beschleunigt. Dank einer hochintegrierten Rechenplatt-



Software-Architektur des Flugrechnungssystems, dargestellt als hierarchische Zirkel mit System-Software, Applikationen, unterstützende Software und Gerätetreiber.

form konnten die mathematisch intensiven Algorithmen für die Lageregelung auf einem winzigen CubeSat implementiert werden. Der Start wird an Bord einer russischen Dnepr-Rakete in Zusammenarbeit mit dem Cal Poly und Stanford CubeSat Programm erfolgen und ist für die zweite Jahreshälfte 2008 geplant. Der standardisierte CubeSat-Verteiler von Cal Poly – das P-POD<sub>1</sub> – wirft dann den PurdueSat aus, sobald sich die Dnepr auf der gewünschten Höhe irgendwo längs des Weges zum vorgegebenen Zielort befindet. Dabei versetzt es ihm einen weichen Stoss und gewährleistet so eine niedrige Spin Rate. Nach einem kleinen Zeitfenster, das eine sichere Trennung ermöglicht, beginnt der Satellit mit seiner Mission. (hr)

Die Firma Schmid Engineering erwarb das Know-how u. a. beim Projekt «Datenerfassung 1000 m unter dem Meeresspiegel» (s. MegaLink Precision 8-2007), für dessen Beschreibung NI den Best Paper Award 2007 verliehen hat.