

STEPHAN BUSCH

MODERNE KLEINSTSATELLITEN – ZWISCHEN ROBUSTHEIT, FLEXIBILITÄT UND EFFIZIENZ



Nach dem Studium der Informatik mit dem Schwerpunkt Robotik spezialisierte sich Stephan Busch in einem Auslandsstudium auf das interdisziplinäre Fachgebiet der Raumfahrttechnik. Neben einem Diplom im Fach Informatik hält er einen Master of Science der Helsinki University of Technology sowie einen Master of Space Science and Technology der Luleå University of Technology. Seit 2008 ist Busch an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg sowie der Forschungseinrichtung ZfT im Bereich miniaturisierter Satellitensysteme tätig. Dabei fokussierte er seine Forschung auf zuverlässige und flexible Kleinstsatelliten für zukünftige Formationsanwendungen. Im Rahmen seiner Forschungs- und Lehrtätigkeit leitete er die Entwicklung des modularen Pico-Satelliten UWE-3, der seit 2013 erfolgreich im Orbit betrieben wird und unter anderem neue Technologieansätze zur Lageregelung demonstriert. Derzeit arbeitet Busch an der Entwicklung einer Satellitenserie zur In-Orbit-Demonstration einer Formation von kooperierenden Pico-Satelliten.

Wurde die Geschichte der Raumfahrt in den letzten Jahrzehnten vor allem von großen multifunktionalen Satelliten dominiert, übernehmen heute miniaturisierte Satellitensysteme zunehmend eine entscheidende Rolle in der fortschreitenden Globalisierung und Demokratisierung der Raumfahrt. Angetrieben wird diese Entwicklung vor allem durch moderne Miniaturisierungstechniken und die damit verbundenen enormen Fortschritte im Bereich kommerzieller Mikroelektronik hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Energieeffizienz und Fertigungsqualität. Aufgrund ihrer erheblich geringeren Masse in der Größenordnung von nur wenigen Kilogramm zeichnen sich Kleinstsatelliten vor allem durch deutlich kostengünstigere und flexiblere Startmöglichkeiten aus. Dabei profitieren sogenannte Pico- und Nano-Satelliten auch von der Einführung einer standardisierten mechanischen Launchschnittstelle, die es den Kleinstsatelliten heute ermöglicht, auf allen gängigen Trägerraketen kostengünstig, kurzfristig, und unkompliziert als sekundäre Nutzlast in den Orbit transportiert zu werden. Derartige Missionen machen den Raumfahrt-Sektor für zahlreiche Nationen zugänglich – bis hin zu kleinen Unternehmen. So wurden allein in den letzten Jahren mehrere Hundert Kleinstsatelliten in den Orbit gebracht – und die Tendenz ist weiter steigend [1].

Die mit der signifikanten Kostenreduktion einhergehende Akzeptanz für ein erhöh-

tes Ausfallrisiko erlaubt den verstärkten Einsatz moderner Technologieentwicklungen auf Satellitensystemen und fördert dadurch – von der ersten Machbarkeitsstudie neuer Technologieansätze bis zum experimentellen Einsatz im Orbit – extrem kurze Entwicklungszeiten. Neben der praxisnahen Ausbildung von Wissenschaftlern und Ingenieuren in der Raumfahrt eignen sich Kleinstsatellitenmissionen daher bereits heute als ideale Plattform für frühe Technologiedemonstrations- und Verifikationsexperimente in Industrie und Forschung und ebnen den Weg für innovative Anwendungen vor allem in den Bereichen Erdbeobachtung und Kommunikation. Zwar wird die Kleinstsatellitentechnologie aufgrund der

Kurzzusammenfassung:

Mit dem Ziel der Entwicklung einer soliden Basisplattform für zukünftige Formationen von Kleinstsatelliten wurden am Beispiel des UWE Pico-Satelliten Bus verschiedene Aspekte für robuste, flexible und effiziente Kleinstsatelliten adressiert, die im Rahmen des UWE-3 Projektes in einem integralen Designansatz konsistent umgesetzt wurden. Neben der Entwicklung von effizienten Redundanzkonzepten mit minimalem Overhead für den optimalen Betrieb auf ressourcen-limitierten Kleinstsatelliten, wurde ein modularer und flexibler Satellitenbus entworfen, der als eine robuste und erweiterbare Basis für zukünftige Missionen dienen soll. UWE-3 wird seit seinem Launch in 2013 erfolgreich im Orbit betrieben, um diverse Technologieentwicklungen für zukünftige Kleinstsatellitenformationen im realen Weltraumfeld zu verifizieren und die erbrachten Fortschritte zu demonstrieren.

limitierten Masse, Größe, und verfügbaren Energie für einige traditionelle Anwendungen nur eine komplementäre Rolle spielen können – allerdings stellen für viele andere Anwendungen diese Limitierungen bereits heute kein Hindernis mehr dar [2]. So konnten in den vergangenen Jahren in zahlreichen Kleinstsatellitenmissionen relevante wissenschaftliche Fragestellungen angegangen werden [3].

Großes Innovationspotential und neue Kommerzialisierungschancen verspricht der effektive Einsatz von Kleinstsatelliten in zukünftigen fraktionierten Missionen, die basierend auf vielen kleinen kooperierenden Systemen große multifunktionale Satelliten ergänzen oder ersetzen können. Dabei können mit Kleinstsatelliten bisher uner-

„Der Raumfahrtsektor beobachtet im Bereich der Kleinstsatelliten gerade eine Bewegung von Hightech-Manufakturen hin zur Serienproduktion für die Realisierung großer Konstellationen und Formationen. Traditionelle Designansätze und Verfahrensweisen sind jedoch nicht für die effiziente Fertigung, Integration und Tests von großen Stückzahlen ausgelegt.“

Stephan Busch

der aktuell aufstrebende kommerzielle Aufbau Kleinstsatelliten-gestützter Kommunika-

tionsnetze verdeutlichen das gesellschaftliche und wirtschaftliche Potential dieser Entwicklungen. Zugleich ergeben sich aus der großen Anzahl zu produzierender und zu testender Satelliten spezielle Anforderungen an Design und Fertigungsverfahren, die traditionelle Hightech-Manufakturen vor neue Herausforderungen stellt.

Trotz der vielversprechenden Chancen für innovative wissenschaftliche, technische und kommerzielle Weltraummissionen verbleibt für das Design robuster und leistungsfähiger Kleinstsatelliten eine Reihe von Herausforderungen. Die signifikanten Einschränkungen bezüglich Größe, Masse und Energieverbrauch, in Verbindung mit der erhöhten Anfälligkeit effizienter Standard-Bauteile gegenüber der rauen Weltraumumgebung, führen nicht selten zu einer vergleichsweise kurzen Missionsdauer von nur wenigen Wochen bis Monaten. Tatsächlich konnten nur etwas mehr als die Hälfte der in den letzten Jahren erfolgreich gestarteten Pico- und Nano-Satelliten ihr primäres Missionsziel im Orbit erfüllen [4]. Zwar wird derzeit noch eine begrenzte Missionsdauer zugunsten kostengünstiger und schneller Entwicklungsschritte für kurzfristige Technologiedemonstrationsmissionen in Kauf genommen. Jedoch werden im Zuge der kommerziellen Nutzung auch Kleinstsatelliten von nachhaltigen Designentwürfen profitieren, um langlebige Missionskonzepte zu realisieren und



Abbildung 1:
Das Flugmodell des Würzburger Pico-Satelliten UWE-3 wurde 2013 gestartet und wird seit über zwei Jahren erfolgreich im Orbit betrieben. Dort demonstriert der Satellit unter anderem neue Technologieansätze zur effizienten Lageregelung. UWE-3 dient als Technologiedemonstrator einer zukünftigen Formation kooperierender Kleinstsatelliten.

Weltraummüll in für Kleinstsatelliten attraktiven erdnahen Orbits langfristig zu minimieren.

Momentan besteht eine zunehmende Forderung nach mehr Leistungsfähigkeit und längeren Missionsdauern bei gleichbleibender Größe und Masse der Miniatursatelliten. Damit in Zusammenhang stehen, im Hinblick auf zukünftige Formations-Missionen, Forderungen nach agilen Entwicklungs- und

Fertigungstechniken. Tatsächlich können treibende Design-Parameter wie Effizienz, Flexibilität und Robustheit im Allgemeinen nicht unabhängig voneinander optimiert werden. So kann ein wiederverwendbares, skalierbares und erweiterbares System nicht so effizient sein wie eine vergleichbare Spezialentwicklung, zumal ein redundant ausgelegtes robustes System meist größer und schwerer ist als ein einfaches Design, während der Einsatz miniaturisierter Kom-

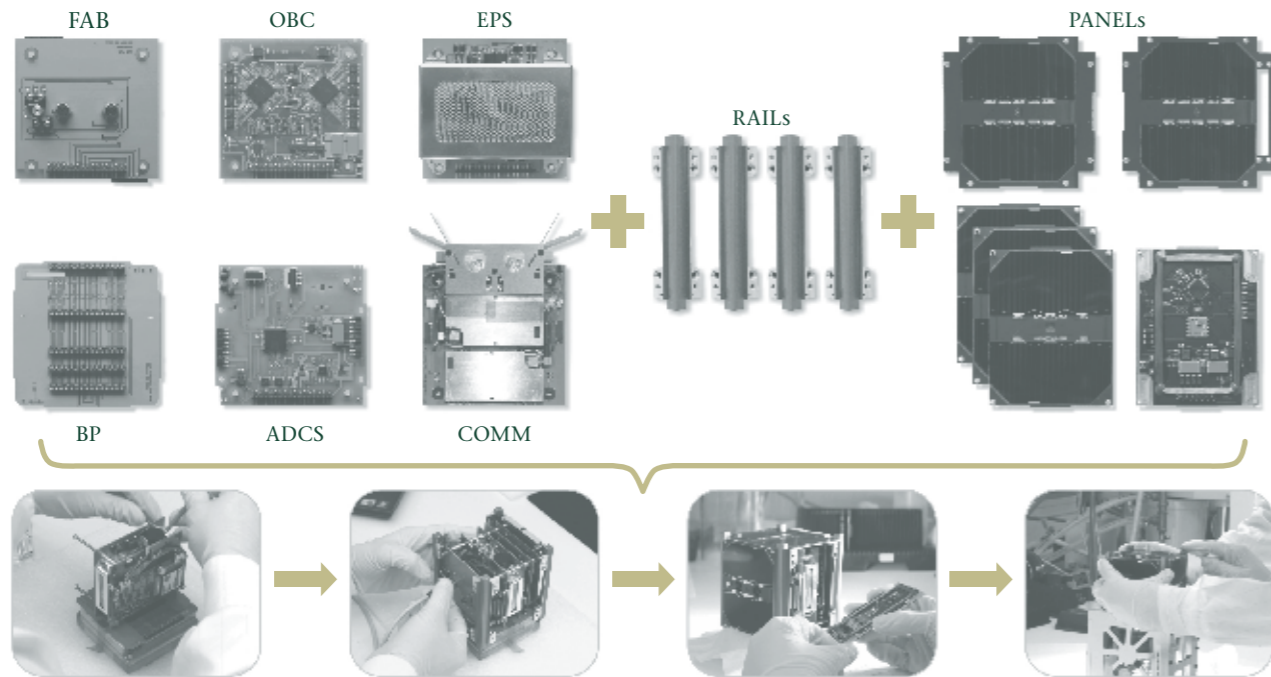


Abbildung 2: Die modulare Satellitenbus-Architektur mit standardisierten Funktions- und Test-schnittstellen erlaubt die einfache und schnelle Integration des Flugmodells durch eine kompakte Plug-and-Play Bauweise ohne Kabelverbindungen. Das flexible Konzept ermöglicht nicht nur die einfache Wiederverwendung und Erweiterung der Systemkomponenten, sondern trägt durch die Förderung der kontinuierlichen funktionalen Testbarkeit massgeblich zur Zuverlässigkeit des Gesamtsystems bei.

ponenten zusätzlich mit einer erhöhten Strahlungsanfälligkeit einhergeht. Auf der anderen Seite kann ein modular aufgebautes, standardisiertes Design die Zuverlässigkeit eines Systems signifikant erhöhen, während ein energieeffizientes Design sogar die Grundlage für eine erweiterbare Plattform darstellt. Ein generisches Design für Miniatursatelliten bedarf demnach eine vorsichtige Abwägung dieser drei Aspekte.

Mit dem Ziel der Entwicklung einer soliden Basisplattform für zukünftige Formationen von Miniatursatelliten wurden am Beispiel der Universität Würzburg Experimentalsatelliten (UWE) verschiedene Aspekte für robuste, flexible und effiziente Kleinstsatelliten adressiert und im Rahmen des UWE-3 Projektes in einem ganzheitlichen Designansatz konsistent umgesetzt [5]. Im Vordergrund der Entwicklungen stehen hier zwei komplementäre Strategien um die Zuverlässigkeit des Satellitensystems, nicht nur konzeptionell im Soft- und Hardwaredesign, sondern auch im Rahmen des Entwicklungs- und Integrationsprozesses praktisch zu unterstützen.

Auf der konzeptionellen Ebene stehen effiziente Redundanzkonzepte mit minimalem Overhead für den optimalen Betrieb auf ressourcenlimitierten Kleinstsatelliten. Dabei können redundante Komponenten im Normalfall die Performanz eines Teilsystems steigern, so dass das Teilsystem beim

Ausfall einer Komponente im Allgemeinen lediglich einen (vorübergehenden) Performanzverlust erleidet. Innovative Fehlererkennungs- und Korrekturmechanismen in Hard- und Software überwachen den Zustand des Systems und stellen im Fehlerfall autonom durch geeignete Maßnahmen den zuverlässigen Betrieb des Satelliten sicher.

Ergänzend zum konzeptionell fehlertoleranten Systementwurf kommen Hard- und Software-Designmaßnahmen zur Anwendung, die den Entwicklungs-, Integrations- und Testprozess unterstützen und damit signifikant zur Zuverlässigkeit des Produktes beitragen. Dabei wird die Testprozedur inhärenter Teil des Systemdesigns. Auf Systemebene steht dabei eine modulare Busarchitektur mit standardisierten Funktions- und Testschnittstellen im Vordergrund.

Neben Vorteilen bezüglich Wiederverwendbarkeit, Wartbarkeit und Erweiterbarkeit kann so vor allem die schnelle und einfache Integration der einzelnen Komponenten in eine kompakte Flugmodellarchitektur – oder alternativ in einen Testaufbau mit komfortablem Zugriff auf alle Subsysteme – ermöglicht werden. Dadurch sollen insbe-

» Die Herausforderung bei der Entwicklung moderner Kleinstsatelliten ist die Gradwanderung zwischen der im Rahmen der Miniaturisierung notwendigen Effizienz, der für die Erfüllung der Mission geforderten Zuverlässigkeit und der wünschenswerten Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit zur Realisierung agiler Kleinstsatelliten-Serien. «

Stephan Busch

sondere frühe funktionale Integrationstests vereinfacht werden. Auf Subsystemebene beinhaltet das Konzept die hardwareseitige Unterstützung für automatisierte Selbsttests, die über komfortable Entwicklungswerkzeuge einfach generiert werden können, um im Verlauf der Entwicklungs- und Integrationsphase sukzessive zu wachsen, und die bis zum Launch kontinuierlich genutzt werden können. Standardisierte und automatisierte Funktionstests kommen nicht nur für Projekte im universitären Umfeld mit starker Mitarbeiterfluktuation, sondern insbesondere auch bei einer Kleinserienproduktion für zukünftige Formationsmissionen zum Tragen.

Der modulare UWE Satellitenbus bildet typische Funktionen eines Satellitensystems auf verschiedene Subsystemmodule mit einer standardisierten mechanischen und elektrischen Schnittstelle ab, die es erlaubt, alle Komponenten durch eine einfache Steckverbindung auf einer kompakten Backplane zu integrieren. Die jeweilige Funktion der Module wird dezentral durch mehrere multifunktionale Seitenpanele ergänzt, die neben elektronischer Komponenten zur Energieerzeugung unterschied-

liche Sensorik und Aktuatorik bereitstellen und der äußeren Weltraumumgebung zugänglich machen. Durch einen integrierten Aluminiumkern dienen die Paneele neben der mechanischen Stabilität zusätzlich zur Strahlungsabschirmung, zum Wärmetransport und als Antennen-Groundplane. Wie schon bei den Subsystemen, wird auch hier bei der elektrischen Integration auf jegliche Kabelverbindung verzichtet, was die rapide und kompakte Integration sowie die leichte Verifikation und Fehlerbehebung nach der Integration des Satelliten erheblich unterstützt.

Alle Subsysteme wurden im Rahmen des Projektes entsprechend den definierten Anforderungen neu entwickelt. Der UWE-3 Bus verfügt über ein zweifachredundant ausgelegten energieeffizienten Boardcomputer, ein redundantes und skalierbares verteiltes elektrisches Energieversorgungssystem, ein zweifach redundant ausgelegtes UHF-Kommunikationssystem sowie eine energieeffiziente Lageerkennungs- und Regelungseinheit. Im Vergleich zu seinen Vorgängern bietet der Satellitenbus deutlich mehr Funktionalität, Leistungsfähigkeit und Redundanz. Dabei nutzt das System nur etwa 70–80 % der verfügbaren Masse und des Integrationsraums aus, und reserviert über 50 % der verfügbaren Energie für zukünftige Erweiterungen. Damit gehört UWE-3 zu den effizientesten Kleinstsatelliten seiner Zeit.

„Mit UWE-3 konnten wir neben der Demonstration energieeffizienter Lageregelungskonzepte als wichtiger Meilenstein zur Realisierung von Kleinstsatellitenformationen vor allem zeigen, dass der auf Standardkomponenten aufgebaute modulare Satellitenbus bereits weit über zwei Jahre den harten Weltraumbedingungen im Orbit standhalten kann.“

Stephan Busch

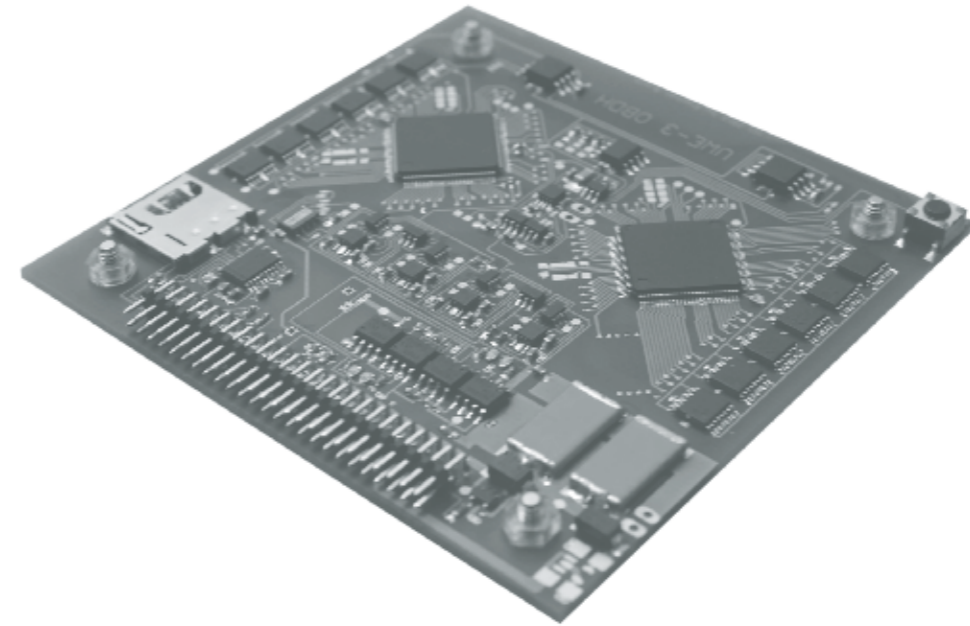


Abbildung 3: Der robuste und energie-effiziente Boardcomputer wurde für den sicheren autonomen Betrieb des Kleinstsatelliten-Bus optimiert. Ausgestattet mit zwei redundanten Mikrokontrollern, die sich gegenseitig überwachen und assistieren, dient er als zentrales Modul zur Systemüberwachung und Reparatur. Zudem führt er sichere in-Orbit Software-Aktualisierungen aller Subsysteme durch. Dabei benötigt das Modul gerade mal 10 mW Leistung.

Aufgrund seiner flexiblen Architektur konnte UWE-3 binnen weniger Stunden vollständig im Reinraum integriert und funktional getestet werden. Seit seinem Launch Ende 2013 arbeitet UWE-3 zuverlässig im Orbit. Neben verschiedenen Experimenten zur Lageregelung und Lageerkennung, als wichtige Meilensteine notwendiger Technologieentwicklungen für die Realisierung von Kleinstsatellitenformationen, konnte die Betriebsphase aufgrund nachträglicher

Softwareerweiterungen mehrfach ausgedehnt werden. Heute spielt UWE-3 eine wichtige Rolle bei der Entwicklung der Nachfolgermission UWE-4. Als echte Erweiterung der UWE-Plattform soll mit UWE-4 erstmals der Einsatz elektrischer Triebwerke zur Orbitkontrolle auf einem Kleinstsatelliten demonstriert werden.

Bis 2018 sollen die technischen Grundlagen gelegt sein, um eine Formation von vier

Abbildung 4:
 Aufgrund seiner modularen Bauweise konnte das UWE-3 Flugmodell binnen weniger Stunden im Reinraum vollständig integriert und auf Funktionsfähigkeit getestet werden. Im November 2013 wurde der Satellit mit einer russischen Dnepr Rakete in einen ernahen Orbit befördert, wo er bis heute zuverlässig seinen Dienst erfüllt, wobei die aktive Betriebsphase durch diverse Softwareupdates mehrfach mit neuen Experimenten erweitert wurde.



kooperierenden Kleinstsatelliten im Orbit zu demonstrieren. Die aktuelle Forschung und Entwicklung konzentriert sich dabei, neben der Untersuchung und Integration miniaturisierter elektrischer Antriebe, vor allem auf diverse Aspekte der treibstoff-

effizienten Formationsregelung. Darüber hinaus bedarf es der Entwicklung und Integration kompakter und effizienter Intersatelliten-Kommunikationssysteme, um den Regelkreis der autonomen Formation im Orbit zu schließen.

Literaturverzeichnis

- [1] Buchen, E. (2014). SpaceWorks' 2014 Nano/Microsatellite Market Assessment. In 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, number SSC14-I-3.
- [2] Selva, D. and Krejci, D. (2012). A Survey and Assessment of the Capabilities of Cubesats for Earth Observation. Acta Astronautica, 74(0): 50–68.
- [3] Jones, N. (2014). Mini Satellites Prove Their Scientific Power. Nature, 508(7496): 300–301.
- [4] Swartwout, M. (2013). The First One Hundred CubeSats: A Statistical Look. Journal of Small Satellites, 2(2): 213–233.
- [5] Busch, S., Bangert, P., Reichel, F., Schilling, K., The UWE Satellite Bus, a Modular and Flexible Architecture for Future Pico-Satellite Formations, In Proceedings of 64th International Astronautical Congress, Beijing, China, 2013, Online Reference: 13.B4.6B.3.
- [6] Busch, S., Bangert, P., Schilling, K., Attitude Control Demonstration for Pico-Satellite Formation Flying by UWE-3, In Proceedings of 4S-Symposium, Mallorca, 2014.
- [7] Busch, S., Bangert, P., Dombrovski, S., Schilling, K., UWE-3, In-Orbit Performance and Lessons Learned of a Modular and Flexible Satellite Bus for Future Pico-Satellite Formations, Acta Astronautica, Vol. 117. 2015: 73–89.