Bild: Jan Bintakies

Schwarm im Orbit

Nanosatelliten-Verband am Himmel leicht erreichbar

Einen Schwarm von Nanosatelliten haben Forscher der TU Berlin im Orbit installiert und vernetzt. Ein solcher Verband ist je nach Größe besser erreichbar als einzelne Satelliten und kann so Zeitvorteile bieten, zum Beispiel bei Frühwarnsystemen.

Von Anette Weingärtner

Jeder einzelne Nanosatellit ist würfelförmig mit einer Kantenlänge von 24 Zentimetern und wiegt knapp neun Kilogramm. Damit sind diese Kisten die Hänflinge unter den Kommunikationssatelliten. Aber sie umkreisen die Erde in niedriger Umlaufbahn dauerhaft im Schwarm, halten Kontakt zueinander und können Datenströme von Knoten zu Knoten per Funk weiterleiten – somit leisten sie etwas, was im Orbit sonst keiner kann.

Forscher um Professor Klaus Brieß am Institut für Luft- und Raumfahrttechnik der TU Berlin haben im Projekt S-Net (S-Band-Netzwerk für kooperierende Satelliten) vier dieser Nanosatelliten von einer Sojus-Rakete ins All tragen lassen und in einem niedrigen Orbit von etwa 580 Kilometer Höhe einen nach dem anderen ausgesetzt. Hier fliegen die vier nun als vernetzter Kleinschwarm hintereinander her, nehmen Daten auf, teilen sie aus und können jeder für sich mit der Bodenstation kommunizieren. Sie bilden damit ein bisher einmaliges Nanosatellite-Netzwerk und haben in ersten Versuchen bereits bewiesen, dass ein solcher Schwarm ganz unterschiedliche Kommunikationsaufgaben auf der Erde lösen kann.

Erste Kommunikation nach der Katastrophe

„Im Grunde ist ein Satellitennetzwerk mit Intersatelliten-Kommunikation überall da einsetzbar, wo terrestrische Kommunikation über Glasfaser und Mobilfunk an ihre Grenzen stößt", sagt Projektleiter Dr. Zizung Yoon. Wenn beispielsweise im Katastrophenfall bei Überschwemmungen, Erdbeben, Vulkanausbrüchen, Tsunamis oder Waldbränden die terrestrische Kommunikation zusammenbricht, kann ein leicht erreichbares Kleinstsatelliten-Netzwerk in der ersten Phase den Informationsaustausch von Behörden und Einsatzkräften vor Ort unterstützen. Wenn das Satellitennetzwerk darüber hinaus auch mit hochauflösenden Kameras bestückt

ist, kann es aufklärende Bildaufnahmen von dem betroffenen Gebiet mit geringem Zeitverzug zur Verfügung stellen; bei der zeitlichen Erreichbarkeit kommt es allerdings ganz wesentlich auf die Größe und Ausdehnung des Satellitenschwarms an.

Ein wichtiges Szenario sind Tsunamiwarnungen. Dabei messen Sensoren an Bojen im Ozean die Strömungsgeschwindigkeit und das Wellenprofil, ihre Messwerte funken sie in den Orbit. Mit diesen Daten lassen sich Tsunamiwellen auf dem Weg zu den umliegenden Küsten frühzeitig identifizieren, um die Vorwarnzeit in den betroffenen Regionen zu verlängern.

An jeder Würfelseite eines der Nanosatelliten ist eine Patchantenne für den Datenaustausch mit den Schwarm-Nachbarn angebracht. Dabei handelt es sich um eine Antennenvariante, die aufgrund ihrer geringen Bauhöhe gut zur Integration auf Leiterplatten geeignet ist. Damit die Antennen von Sender und Empfänger während des Datenaustauschs ihre relative Orientierung zueinander beibehalten, wird die Lage des Satelliten auf allen drei Raumachsen geregelt. Reaktionsräder und Magnetspulen übernehmen die Steuerung.

Reaktionsräder arbeiten nach dem Prinzip des Drehimpulsaustausches. Durch Änderung der Drehzahl wirkt ein Drehmoment auf den Satelliten, um ihn in entgegengesetzter Richtung zu drehen. Als zweites System werden Magnetspulen mit Strom versorgt und erzeugen daraus ein magnetisches Dipolmoment. Das steht in Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld und erzeugt eine Kraft, die ebenfalls als Drehmoment auf den Satelliten wirkt. Auch darüber kann die Lage des Satelliten neu ausgerichtet werden.

Unterwegs ohne Antrieb

Über einen eigenen Antrieb der Satelliten haben die Forscher lange nachgedacht, denn schließlich wollen sie den Schwarm über Jahre zusammenhalten. „Mit der aktuell eingesetzten Konfiguration der Funktechnik ist ein Datenaustausch bei 400 Kilometer Entfernung schon nicht mehr möglich", erläutert Yoon. Zurzeit haben die Satelliten einen Abstand von 200 Kilometern zueinander. Wie kann man also den Schwarm der minimalistischen Nanosatelliten steuern und am Auseinanderdriften hindern? Jedes Antriebssystem habe sich als zu aufwendig erwiesen, weshalb eine andere Lösung her musste.

Zunächst einmal mussten die Satelliten direkt beim Aussetzen im Orbit nahe beieinander platziert werden. Dazu entwickelte der Berliner Projektpartner Astro- und Feinwerktechnik Adlershof eigens einen Container, der die Satelliten beim Aussetzen akkurat im Zehn-Sekunden-Takt nacheinander im Orbit positionierte. Durch diesen Vorgang startete der Satellitenschwarm von Beginn an mit einem passenden Abstand und in nahezu gleicher Geschwindigkeit.

Damit aber in den Folgejahren nachjustiert werden kann, ersannen die Forscher eine Technik, um die relative Position der Satelliten zueinander ohne Antrieb zu beeinflussen. Dazu nutzen sie die geringe Restatmosphäre im erdnahen Orbit und einen überraschenden Effekt: Nicht etwa der schnellste, sondern der langsamste Satellit stellt seinen Flugwinkel so ein, dass er mit maximaler Fläche in Flugrichtung unterwegs ist. Somit hat er den höchsten Atmosphärenwiderstand und verliert an Flughöhe. Eine verringerte Flughöhe resultiert allerdings in einer höheren Orbitalgeschwindigkeit. „Damit holt unser Sorgenkind gegenüber den anderen Satelliten wieder auf", sagt Yoon.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich daraus, dass die Nanosatelliten eine begrenzte elektrische Leistung haben, die aber ausreichen soll, um viele Daten über große Reichweite zu senden. Die einzelnen Satelliten sind wie üblich mit Solarpaneelen für die Energieaufnahme ausgerüstet. Sie speichern die Energie in Lithium-Ionen-Akkus, welche den Satelliten speisen, wenn der sich auf der Nachtseite befindet. Aber mit diesem Energievorrat ist streng zu haushalten. Die Entwickler besannen sich darauf, dass eine Antenne eine Richtwirkung hat, das heißt die Signale werden gebündelt in eine Richtung ausgestrahlt. Somit müssen nicht alle Antennen zugleich aktiv sein.

Schließlich sparten die Wissenschaftler bei den Nanosatelliten auch an kostspieligen strahlungsharten Komponenten, welche speziell für den Weltraumeinsatz entwickelt und hergestellt werden und insbesondere resistent gegen hochenergetische Teilchenstrahlung sind. Stattdessen wurden kommerziell verfügbare Bauteile und Komponenten für Bordrechner, die Sensorik und Energieversorgung eingesetzt. „Wir analysieren die Strahlungsdosis in der Umlaufbahn und führen eigene Strahlungstests im Labor durch, um die Eignung der Bauteile unter Weltraumbedingungen zu validieren. Wenn nötig, entwickeln wir eigene spezielle Abschirmungen", erläutert Yoon.

Mit wenig Porto in den Orbit

Nanosatelliten haben gegenüber konventionellen Satelliten den Vorteil, dass sie viel kompakter und weniger aufwendig in der Beförderung in den Orbit sind. So rechnet man ganz grob mit Kosten von 20.000 bis 30.000 Dollar, um ein Kilogramm Fracht in den Orbit schaffen zu lassen. Ende Februar sind gerade die ersten sechs OneWeb-Satelliten ins All geschossen worden, Gewicht jeweils rund 147 Kilogramm. Für das OneWeb-Projekt

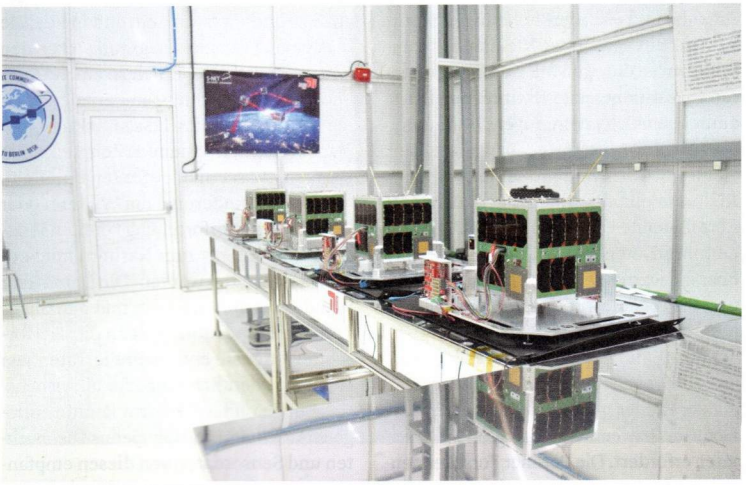

Bild: Roskosmos/ECM

Der finale Checkout im Reinraum: Vier Würfel zu je neun Kilogramm bilden heute im Orbit den ersten vernetzten Satellitenschwarm.

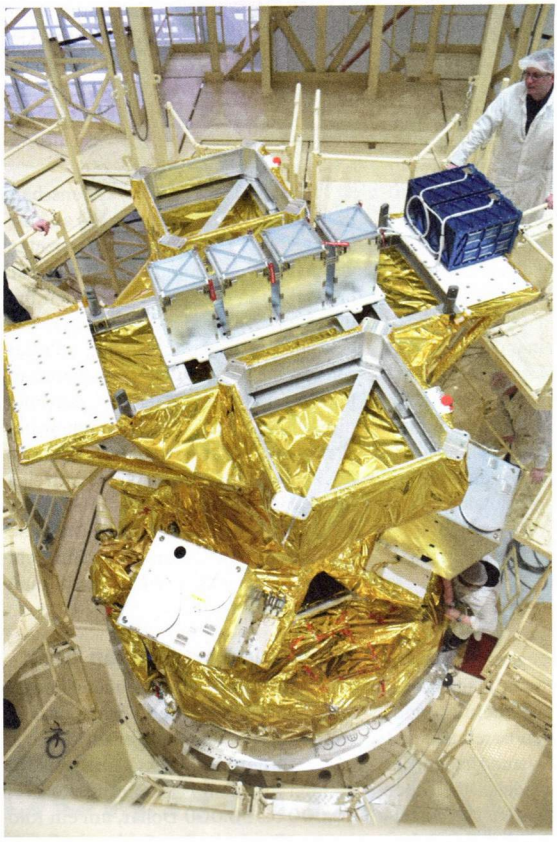

Bild: Roskosmos/ECM

Endgültig platziert in der Sojus-Kapsel am Weltraumbahnhof Vostochny: Die vier Nanosatelliten der TU Berlin mussten im kurzen Abstand zueinander präzise im Orbit ausgesetzt werden.

hat ein US-Unternehmen angekündigt, Hunderte Satelliten in einem 1000-Kilometer-Orbit zu platzieren und damit in Zukunft weltweit schnelles Internet zu ermöglichen. Das ist eine datenintensive Aufgabe und erfordert hohe Investitionskosten. Ein vernetzter Kleinstsatellitenschwarm ist dagegen mit weitaus geringeren Investitionen zu verwirklichen, kann dafür aber auch nur geringere Datenraten übertragen.

Je nach Schwarmgröße sind vernetzte Kleinstsatelliten schneller erreichbar als Einzelsatelliten im gleichen Orbit. Die senden ihre Daten erst bei einem Überflug über die wartende Bodenstation zur Erde, und das bedeutet oft eine Verzögerung von mehreren Stunden. Ein mächtiger Schwarm hingegen könnte selbst eine große Menge von Sensoren und Geräten auf der Erdoberfläche effizient vernetzen – wenn die Anwendung keine großen Datenraten erfordert. Die Berliner Forscher nennen in diesem Zusammenhang Anwendungsbeispiele wie das Smart Farming, Animal Tracking oder den Umweltschutz.

Zum Beispiel können Felder großflächig mit Sensoren bestückt werden, um Feuchtigkeit, Temperatur, Bodenbeschaffenheit oder Schädlingsvorkommen zu vermessen. Diese Daten sammelt dann ein Satellitennetzwerk ein und meldet sie über einen Dienstleistungsanbieter an den Bauern zurück. Der erhält so einen Überblick über die wichtigsten Parameter seiner Felder und kann damit Aktivitäten planen, also den optimalen Zeitpunkt zum Düngen, Wässern oder Ernten ermitteln.

Zur Verhinderung von Wilderei oder im Sinne der Tierforschung könnten Wildtiere vom Wal bis zum Nashorn mit Sendern ausgestattet werden. Die Daten über Wanderungsbewegungen und auffälliges Verhalten unterstützen dann die Tierforschung oder sie entlarven die Taten von Wilderern deutlich schneller als bisher.

Ein Satellitenschwarm könnte entlegene Abschnitte von Ölpipelines beobachten und Sensordaten von diesen empfangen. Über diesen Weg würden dann Beschädigungen früh gemeldet und Reparaturen kurzfristig angeleiert. Auch wenn Kriminelle eine Pipeline anzapfen, leitet ein Satellitenschwarm den Hilferuf der Sensoren dann an die Zentrale weiter. Ein vergleichbares Anwendungsfeld stellen Windparks weit draußen vor der Küste dar. Nanosatelliten könnten diese Anlagen kostengünstig überwachen und die Statusdaten der Windräder zwecks Wartung an die Leitzentrale übermitteln.

Von Satellit zu Satellit

Die Technik für die Intersatelliten-Kommunikation ist bereits in einem vorangegangenen Projekt der TU Berlin in Zusammenarbeit mit IQ wireless entstanden. Das dabei entwickelte Funkmodul S-Link verwendet die S-Band-Frequenz 2,2 Gigahertz, als Funkverfahren wird Adaptive Coding and Modulation (ACM) eingesetzt. Das bedeutet, dass die Empfangsqualität an den Sender rückübertragen wird, so dass dieser bei ungestörtem Übertragungskanal ein effizienteres Kodierungsschema nutzt und bei Rauschen auf eine fehlertolerantere Variante setzt. Ein eigens entwickeltes Protokoll ermöglicht in S-Link die Netzwerkkommunikation mit mehreren Teilnehmern.

Bei der Entwicklung des Kommunikationsmoduls legten die Forscher Wert auf eine kompakte und leichte Konstruktion, die am Ende mit Gehäuse gerade einmal 0,3 Kilogramm zusammenbringt. Ebenso optimierten die Entwickler den Stromverbrauch. „Die Kommunikation im S-Band funktioniert Peer-to-Peer (P2P), das heißt, es wird immer eine sogenannte Session zwischen zwei Satelliten initiiert", erläutert Yoon. Innerhalb einer Session gibt es einen „Caller" und einen „Responder"-Satelliten. Der Informationsaustausch geschieht im Time Division Duplex (TDD), Caller und Responder wechseln sich also mit dem Senden ab. Sollen Daten innerhalb des Netzwerkes durch mehrere Satelliten durchgeleitet werden, kommt ein Routingprotokoll zum Einsatz, das den kürzesten Pfad zwischen zwei Knoten in einem kantengewichteten Graphen berechnet. Das Grundprinzip ist dem der optimalen Wegsuche im Auto-Navi ähnlich.

Die S-Net-Satelliten sind für eine Kommunikationsentfernung bis 400 Kilometer entworfen. Mit dem aktuellen Protokoll sind 800 Kilometer möglich. Auch größere Reichweiten könnten je nach Sendeleistung und Datendurchsatz verwirklicht werden. Ein erdumspannendes Netzwerk auf einer Erdumlaufbahn erfordert somit je nach Anwendung und

Leistungsfähigkeit mehrere Dutzende bis mehrere hundert Satelliten. „Es ist letztlich ein Optimierungsproblem mit einigen Parametern", sagt Yoon und zählt auf: „geforderter Datendurchsatz, zulässige Latenzzeiten, Anzahl von gleichzeitigen Kommunikationsteilnehmern, Frequenzauswahl, Orbit- und Konstellationsdesign, Antennencharakteristik und Sendeleistung, Quality of Service et cetera."

Kontakt beim Überflug

Mit dem S-Link-Funktransceiver werden bei der Mission der Berliner erstmalig mehrere Nanosatelliten im Weltraum funktechnisch verbunden, sie umkreisen die Erde als ein verteiltes Satellitensystem. Zudem gewährleistet der Funktransceiver die Kommunikation mit der Bodenstation. Daten werden aufgrund der Umlaufbahn und Geschwindigkeit des Kleinschwarms im erdnahen Orbit dreimal am Tage und dreimal nachts empfangen. Jeder Überflug bringt die Vierergruppe für sechs bis zwölf Minuten in Reichweite.

Damit vom Boden aus die genaue Position jedes Satelliten im Orbit erkennbar ist, trägt jeder einzelne von ihnen Retroreflektoren mit individuellen Mustern. Diese werfen Laserimpulse unabhängig von der Einfallsrichtung sowie der Ausrichtung des Reflektors in die Richtung zurück, aus der sie gekommen sind. In Satelliten kommen sie zum Einsatz, damit eine Bodenstation die Signallaufzeiten genau bestimmen kann. Bei solchen Messungen kann die Satellitenposition auf wenige Zentimeter genau abgeleitet werden, womit auch die Geschwindigkeit präzise zu ermitteln ist. Ein weltweites Netzwerk aus 45 Laser-Ranging-Stationen, das der International Laser Ranging Service (ILRS) betreibt, wird für diesen Dienst in Anspruch genommen.

Durch seine kurzen Signallaufzeiten kann ein Satellitenschwarm in niedriger Umlaufbahn sogar als Baustein für Konzepte des kooperativen Fahrens dienen. Vernetzte Fahrzeuge könnten in der Zukunft von mehr Sicherheit profitieren und Verkehr intelligent steuern helfen, indem beispielsweise Informationen zu einem Stauende oder einem Unfall auf der Autobahn von Fahrzeug zu Fahrzeug nach hinten durchgereicht werden. So können nachfolgende Fahrer früher reagieren. Für den Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen wird primär Car-to-Car-Funkkommunikation eingesetzt, Satellitenkommunikation könnte aber als Back-up dienen, sollte die Verbindung zwischen den Fahrzeugen unterbrochen sein. Traditionelle geostationäre Satelliten auf einer Kreisbahn 35.786 Kilometer über der Erdoberfläche am Äquator kommen für solche sicherheitskritischen Anwendungen aufgrund ihrer hohen Signalverzögerung von etwa einer halben Sekunde kaum in Frage. Ein großer Satellitenschwarm, von dem ständig ein Mitglied direkt erreichbar ist, könnte dann eine schnellere Alternative bieten.

„Je größer die Abdeckung durch den Schwarm, desto weniger Zeit wird benötigt, um Daten von A nach B zu senden", betont Yoon. Ein weiterer Vorteil der Schwarm-Topologie besteht darin, dass bei ausreichender Anzahl auch einzelne Satelliten ausfallen können, ohne dass damit schon der Zusammenhang unterbrochen sein muss. Ein Schwarm bedeutet damit mehr Sicherheit gegenüber einzelnen Ausfällen. Auf der anderen Seite heißt das allerdings, dass eine Schwarm-Anwendung eine gewisse Anzahl an Satelliten für ein Netzwerk erfordert. Die Herstellung- und Startkosten summieren sich damit. „Zudem werden die Nanosatelliten nie den Datendurchsatz eines großen geostationären Kommunikationssatelliten erreichen", sagt Yoon.

Letztlich haben die innerhalb des S-Net-Projekts entwickelten Nanosatelliten in extrem niedriger Höhe noch einen ökologischen Vorteil: In etwa 14 Jahren werden sie soviel an Flughöhe verloren haben, dass sie nach und nach in die Erdatmosphäre eintauchen und verglühen, während Satelliten in größeren Höhen zunehmend die Erdumlaufbahnen als Weltraumschrott belasten. *(agr@ct.de)* ct

Zwei Funksysteme

Das neu entwickelte Funkmodul S-Link verwendet im S-Band (2,0 bis 2,3 Gigahertz) die Frequenz 2,2 GHz. Damit überträgt S-Link zwischen den Satelliten mit einer Datenrate von 100 Kilobit pro Sekunde. Auch im Uplink von der Erde wird dieser Wert erreicht, im Downlink zur Bodenstation beträgt die Datenrate sogar ein Megabit pro Sekunde. Zusätzlich nutzen die Nanosatelliten als redundantes System Antennen für das UHF-Amateurfunkband von 430 bis 440 Megahertz. Dieses Frequenzband dient vor allem für omnidirektionale Übertragungen vom Boden an mehrere Satelliten, beispielsweise für Kommandos an alle Schwarmmitglieder. Die Datenrate hier beträgt 4,8 Kilobit pro Sekunde.

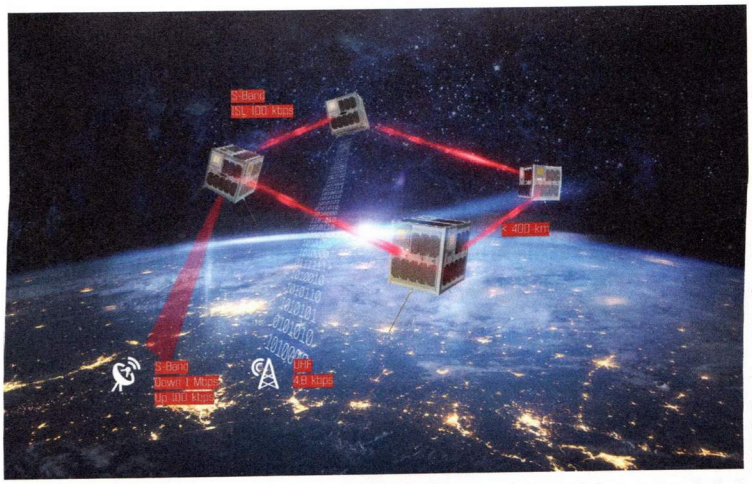

Bild: TU Berlin

Die vier Nanosatelliten bleiben im Schwarm zusammen und kommunizieren im S-Band. Der Kleinschwarm ist vom Boden aus sechs Mal täglich für einige Minuten erreichbar, größere Schwärme könnten viel länger in Reichweite sein.