

S-BAND-SENDER FÜR NANO- UND PICO-SATELLITEN

Förderzeichen:15YB0513

R. Alavi(1),K. Brieß(1), K. Jäckel(2), H. Podolski(2)

1 – TU Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, Marchstr. 12, D-10587 Berlin

2 – IQ Wireless GmbH, Carl-Scheele-Str. 14, D-12489 Berlin

Kontakt: rozbeh.alavi@ilr.tu-berlin.de

Zusammenfassung

Kleinsatellitenmissionen sind durch vielfältige Zielstellungen und eine besonders hohe Kosteneffektivität gekennzeichnet. In Zukunft werden hochintegrierte Satelliten mit einer Gesamtmasse von nur 0,1kg bis 10kg, die sogenannten Pico- und Nanosatelliten, eine immer größere Rolle bei der Lösung unterschiedlicher Fragestellungen aus den Bereichen Umweltüberwachung, Katastrophenvorsorge, Mobilität, Sicherheit und Extraterrestrik spielen. Nano- oder Picosatelliten können bestehende oder geplante Missionen ergänzen (nicht ersetzen), um eine höhere Beobachtungsrate zumindest mit ausgewählten Instrumenten zu erreichen und auch neue Anwendungsgebiete zu erschließen. Pico-Satelliten mit verschiedenen Instrumenten können zu Clustern oder Schwärmen zusammengeschlossen werden und ein Ziel simultan oder in definierter Abfolge beobachten.

Gegenwärtig arbeiten und forschen ca. 80 Universitäten weltweit an der Erhöhung der Leistungsfähigkeit aller Teilfunktionen eines Nano- bzw. Pico-Satelliten. Dabei stellt die Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Nachrichtenübertragung vom Satelliten zum Boden mit minimalem Ressourceneinsatz eine wichtige Aufgabe dar. In dem Vortrag wird eine Lösung für eine hochintegrierte, höherratige Satellitenkommunikation im S-Band vorgestellt, die für den Einsatz auf einem Pico-Satelliten geeignet ist. Der neuartige Ansatz für die Verringerung der Sendeleistung und damit auch die Verringerung des Gesamtstromverbrauchs als wichtiger Eckparameter bietet der Einsatz störsicherer, fehlertoleranter Kanalkodierungsverfahren und Übertragungsprinzipien unter Nutzung von angepassten Faltungs- und/oder Turbo-Codes. Verschiedene Verfahren wurden in dem Vorhaben hinsichtlich ihrer Eignung für den speziellen Satellitenkanal untersucht und in einem Demonstrator implementiert. Dieser wurde in einem speziellen Programm für den Einsatz im Weltraum qualifiziert. Einige technische Parameter des S-Bandsenders sowie weitere Anwendungsmöglichkeiten werden in dem Vortrag vorgestellt.

1. IDEE UND ZIELSTELLUNG

Das Einsatzgebiet der Kleinsatelliten vergrößert sich kontinuierlich auf Grund der Kosteneffektivität der Missionen. Längst haben Satelliten in der 10-100 kg Klasse – Microsatelliten – das Status als Forschungssatellit aufgegeben und werden als operationelle Systeme eingesetzt. Ebenfalls ist ein Wachstum der jährlichen Startraten seit 2001 festzustellen. Die Aufgabenbereiche von Satelliten dieser Größenordnung sind vielfältig. Sie werden sowohl in Missionen zur Erdbeobachtung als auch zur Kommunikation- und Technologieerprobung eingesetzt. Ein weiteres Einsatzgebiet betrifft wissenschaftliche

Fragestellungen der Fernerkundung der Erde und ihrer Umgebung.

Eine immer größere Rolle werden in Zukunft die so genannten Pico- und Nanosatelliten bei der Lösung unterschiedlicher Problemstellungen spielen. Diese Satelliten besitzen eine Gesamtmasse zwischen 0,1 bis 10 kg und eine hochintegrierte Bauform. Pico- und Nano-Satelliten werden nicht nur in den Bereichen von Umweltbeobachtung, Katastrophenvorsorge und Mobilität eingesetzt, sondern können auch zur Unterstützung vorhandener Systeme wertvolle Dienste leisten, um eine erhöhte Effektivität zu erzielen.

Ein weiterer Vorteil von Satelliten in dieser Größe ist ihr

Einsatz in Schwärmen bzw. Clustern. Dabei wird nicht nur eine erhöhte Beobachtungsrate erreicht, sondern durch den Einsatz unterschiedlicher Sensoren können auch neue Anwendungsgebiete erschlossen werden. Hinzu kommt, dass bei dem Ausfall eines einzigen Satelliten die gesamte Mission nicht gefährdet wird.

Zurzeit arbeiten ca. 80 Universitäten weltweit daran die Leistungsfähigkeit von Subsystemen für Pico- und Nano-Satelliten zu erhöhen. Eine wichtige Randbedingung für die Entwicklung solcher Subsysteme ist der minimale Ressourceneinsatz bei maximaler Leistungsfähigkeit. Dabei stellt sich die hochratige Übertragung von anfallenden Daten vom Satelliten zur Boden mit möglichst geringem Leistungsverbrauch als eine wichtige Aufgabe dar. An dieser Stelle müssen moderne Übertragungsmethoden auf ihren effektiven Einsatz zur Datenübertragung vom Weltraum aus untersucht werden.

In diesem Beitrag wird eine Lösung für eine hochintegrierte, höherratige Satellitenkommunikation in S-Band vorgestellt, die für den Einsatz auf einem Pico-Satelliten geeignet ist. Verschiedene Übertragungsprinzipien wurden in diesem Vorhaben auf ihre Eignung zur Satellitenübertragung hin untersucht. Das Ergebnis der Untersuchungen wurde in einem Demonstrator implementiert und in einem speziellen Programm für den Weltraum qualifiziert. Bei diesem Sender – HISPICO – kommen zur Verringerung der Sendeleistung und damit des Gesamtverbrauches störsichere und fehlertolerante Kanalkodiervorfahren zum Einsatz. Einige technische Parameter des S-Bandsenders werden in diesem Beitrag vorgestellt und weitere Anwendungsmöglichkeiten und Einsatzgebiete diskutiert.

2. TECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN UND RANDBEDINGUNGEN

An dieser Stelle werden die technischen Randbedingungen und die Motivation bei diesem Vorhaben erläutert. Die Sendeeinheit HISPICO arbeitet im S-Band und ist für den Bereich 2200-2290MHz ausgelegt. Die meisten Anwendungen erfordern eine hohe Übertragungsrate und damit eine leistungsfähige Übertragungsstrecke. Bei größeren Satelliten werden oft einige Megabit pro Sekunde gefordert, bei Pico-Satelliten stellte sich jedoch heraus, dass 1Mbps ein guter Kompromiss zwischen anfallenden Daten und vorhandener Energie ist. Untersuchungen ergaben, dass die maximale Leistung von 5W nicht überschritten werden darf, da sonst andere Systeme des Satelliten ausfallen würden. Für die Datenübertragung bedeutet dies, dass die 1Mbps bei einer Sendeleistung von 1W erreicht werden sollte.

Eine Herausforderung bei den erwähnten Randbedingungen lag in der Integration des Systems in ein Volumen, das nicht größer als 5% eines Pico-Satelliten sein durfte. Die Wärmeübertragung aus dem Gerät stellte ein weiteres Problem dar, das mit Hilfe von einem Kühlkörper gelöst wurde. Somit ist eine Funktion im Bereich von +65° gewährleistet.

Weiterhin ergaben sich bei Berechnungen für das Linkbudget, dass die Einhaltung einer fehlerfreien

Übertragungsrate von 1Mbps bei 1W Sendeleistung den Einsatz von speziellen gewinnbringenden Übertragungsverfahren erfordert.

Um den benötigten Gewinn von 4 bis 5dB zu erreichen, wurden Untersuchungen von geeigneten Kanalkodiervorfahren auf Basis von Faltungscodes und TURBO-Codes angestellt. Zusätzlich wurden verschiedenen Modulationsverfahren zur Erhöhung der Effizienz der Übertragung betrachtet. Die Auswahl des Modulationsverfahrens geschah durch vergleichende Bewertung von DQPSK-, Offset-DQPSK- und pi/4-DQPSK-Verfahren. Dabei stellte sich heraus, dass die DQPSK in Kombination mit TURBO-Code am besten für diese Applikation geeignet ist. Weiterhin wurden durch Modellierung des Funkkanals wichtige Kenngrößen wie Dopplerspreizung, Frequenzselektivität und Fadingreserve abgeleitet.

Die für den Aufbau der Funkstrecke benötigte Satellitenantenne stellte eine weitere Herausforderung dar. Bei einem Pico-Satelliten handelt es sich um einen würfelförmigen Satelliten mit einer definierten Kantenlänge von 10 cm, wobei auf den Seitenflächen Solarzellen für die Energieversorgung aufgebracht werden. Die Satellitenantenne - eine rechts zirkular polarisierte (RHCP) Patchantenne - sollte so konzipiert werden, dass sie nicht mehr als 40% einer Seitenfläche belegt. Um bei der Übertragung möglichst hohe Gewinne zu erzielen, wurde die Antenne so ausgelegt, dass durch eine spezielle Ansteuerung die Keulenöffnung verringert und dadurch das Signal gerichtet wird. Damit werden Antennengewinne bis zu 5 dB erzielt. Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit dem Funktionsprinzip des HISPICO-Systems.

3. DAS SYSTEM HISPICO UND SEIN FUNKTIONSPRINZIP

Der modulare Aufbau des HISPICO-Systems sorgt nicht nur für seinen flexiblen Einsatz sondern garantiert höchster Mobilität. Das System besteht aus einem Satellitensender mit Patchantenne und einem bodenseitigen Empfänger. BILD 1 stellt die Funkstrecke des HISPICO schematisch dar.

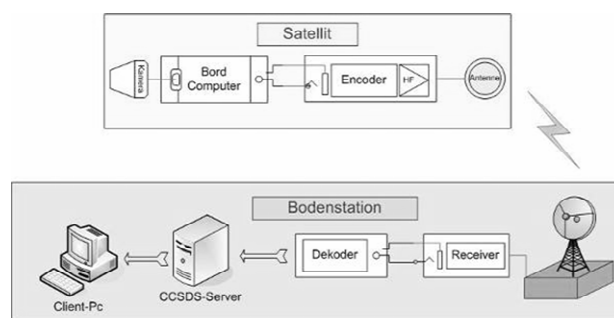


BILD 1. Abbildung 1 Schematischer Aufbau der Funkstrecke

Die Sendeeinheit kann grob in drei Teileinheiten unterteilt werden:

- 1) Encoder

- 2) HF-Modul
- 3) Antenne oder Antennensystem

Die Encodereinheit des Senders übernimmt die Kodierung der Daten. In diesem Fall kommen hocheffektive und moderne Kanalkodierung, die einen hohen Gewinn gewährleisten zum Einsatz (TURBO-Code). Der kodierte Datenstrom wird anschließend auf einer definierten Frequenz moduliert, verstärkt und über die Antenne abgestrahlt. Nach dem Empfang auf der Erde erfolgt die Demodulation und Dekodierung.

3.1. Link Budget

Ein wichtiger Aspekt bei der Auslegung und Entwicklung eines Kommunikationssystems liegt in der fehlerfreien Übertragung der Daten. Es muss nachgewiesen werden, dass bei der gegebenen Sendeleistung unter den herrschenden Umweltbedingungen die geforderte Datenrate erreicht wird, ohne die vorgeschriebene Fehlerrate zu überschreiten. Bei digitaler Übertragung ist die benötigte Energie pro Bit gegeben durch:

$$(1) \quad \frac{E_b}{N_0} = \ln\left(\frac{1}{2BER}\right)^2$$

Bei einer $BER = 10^{-6}$ wird eine $E_b/N_0 = 10\text{dB}$ benötigt. Durch die Übertragungsstrecke zwischen Satelliten und Erde treten verschiedene Verluste auf, die in der Bilanz berücksichtigt werden müssen [1][2]. Es gilt für eine Datenübertragung in S-Band aus einem Orbit mit der Höhe d :

$$(2) \quad \frac{C}{N} = \frac{P_t G_t G_r G_c}{k T_s B} \frac{1}{\sum L} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

bei einer Sendeleistung P_t , einem Antennengewinn des Senders G_t , einem Antennengewinn des Empfängers G_r . Dabei stellen T_s und L verschiedenen Verluste und Rauschen dar. Die Bandbreite ist B ist abhängig von der Modulation. Die Bilanz wird sowohl mit als auch ohne Kodegewinn aufgestellt, wobei für die Kanalkodierung mit TURBO-Code einen Gewinn G_c von ca. 6 dB angenommen wird.

Für die Bilanz wurde der worst case angenommen, in dem der Satellit in einer Höhe von 850km die Erde umkreist. Der Empfang sollte bei einer Elevation von 10° möglich sein. Es stellt sich heraus, dass bei einer Sendeleistung von 1W, einer Empfangsantenne mit einem Durchmesser von 1,8m und einer Satellitenantenne mit einem äquivalenten Durchmesser von 0,075m die Datenrate von 1Mbps nicht erreicht werden kann. Das Link Budget weist

im nicht kodierten Fall eine negative Bilanz auf. Dagegen kann die Datenrate mit einem Kodegewinn von 6dB unter den gegebenen Randbedingungen mit einer positiven Bilanz erreicht werden. Die Fehlerrate beträgt dabei 10^{-6} . Im Laufe des Projekts konnten diese theoretische Berechnung durch praktische Tests nachgewiesen werden [3].

3.2. Funkkanal

Für die Konzipierung eines störsicheren Kanalkodierungsverfahrens galt es durch vergleichende Bewertung verschiedener Modulationsverfahren, das geeignete auszuwählen. Dafür wurde der Funkkanal modelliert und verschiedene Parameter und Kenngrößen für die Bewertung abgeleitet.

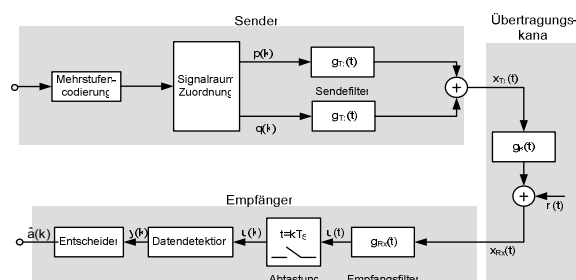


BILD 2. Modell des Funkkanals

Die Modulationsverfahren DQPSK-, Offset-DQPSK- und pi/4-DQPSK wurden auf ihre Eignung hin untersucht und verglichen. Bei den Untersuchungen ging es um die maximale Aussteuerbarkeit der Endstufe für eine vorgegebene Bitfehlerrate und die Beeinflussung anderer Funkdienste durch parasitäre Nachbarkanalabstrahlungen und den Einfluss des Impulsformungsfilters auf diese Werte. Die aufgeführten Diagramme stellen die Ergebnisse dar. Es stellte sich heraus, dass DQPSK am besten für unsere Anwendung geeignet.

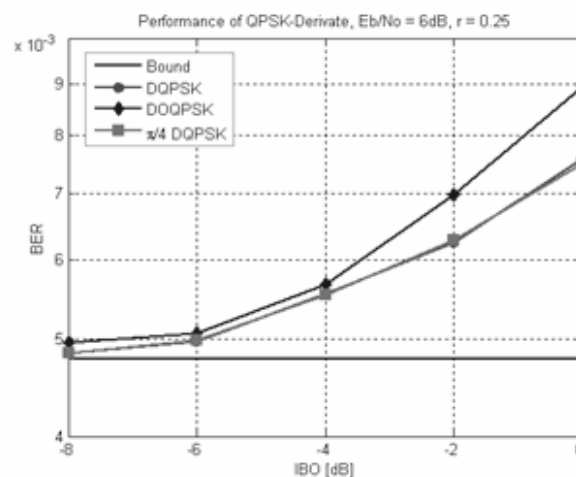


BILD 3. Eingangsleistungsreserve der QPSK-Derivate

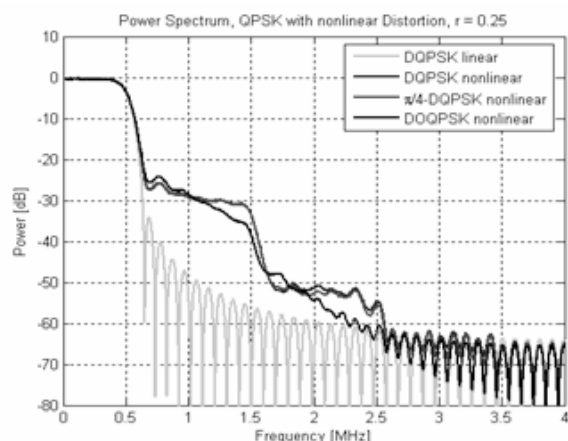


BILD 4. Powerspektrum der QPSK-Derivate

Mit der selben Vorgehensweise wurden die Kanalkodierungsverfahren untersucht und ausgewählt. Dabei wurden geeigneten Kanalkodierungsverfahren (Forward Error Correction) auf Basis von Faltungskodes (mit Kodierate $r=1/2$ und Anzahl der Informationsbits von $k=9$) und TURBO-Codes untersucht.

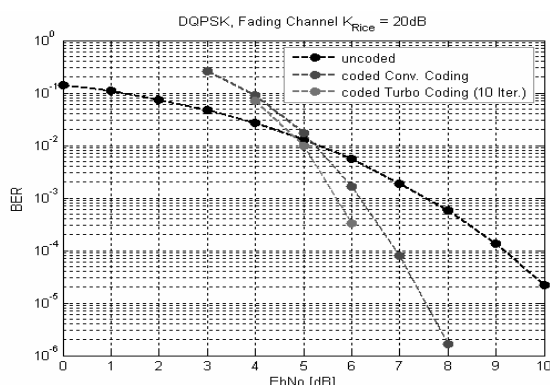


BILD 5. Fehlerrate mit und ohne Kodierung

BILD 5 stellt die BER in Abhängigkeit von der benötigten E_b/N_0 dar. Es wird deutlich, dass die Kodierung des Funkkanals einen Gewinn von bis zur 5dB gegenüber des unkodierten Kanal erzielt. Dabei ist der der TURBO-Code um 2dB besser.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnisse wurden verschiedene Ingenieursmodelle fertig gestellt, womit das Übertragungsverfahren verifiziert werden konnte. Im nächsten Schritt wurden die Miniaturisierung und Weltraumqualifikation vorgenommen.

4. WELTRAUMQUALIFIKATION VON HISPICO

Für die Qualifikation von Satellitenkomponenten gibt es verschiedene Strategien. Die Modellphilosophie wird auf die jeweiligen Erfordernisse angepasst.

Die für das HISPICO Projekt gewählte Strategie ist dem BILD 6 zu entnehmen. Nach der Sicherstellung der Funktionalität wurde aus dem Ingenieursmodell ein Qualifikationsmodell entwickelt, an dem alle Qualifikationstests durchgeführt wurden. Die Verifikation an nur einem Modell hat den Vorteil der Kostenreduktion gegenüber der Variante mehrerer Testmodelle.

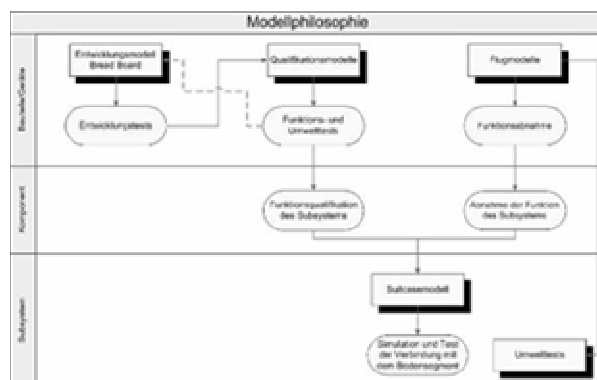


BILD 6. HISPICO Modellphilosophie

Das Ziel der Qualifikation besteht in der Demonstration, dass das Design alle Anforderungen einschließlich Reserven erfüllt. Die Intensität der Tests am Qualifikationsmodell ist höher als die zu erwarteten Belastungen.

Die Reihenfolge der Tests wurde aufgrund des testabhängigen, eingeschätzten Ausfallrisikos der verwendeten COTS-Bauteile beschlossen. BILD 7 zeigt die gewählte Abfolge. Außerdem wurde im Anschluss an jeden Versuch ein Funktionstest durchgeführt, der die Nichtbeeinträchtigung des Senders sicherstellt.

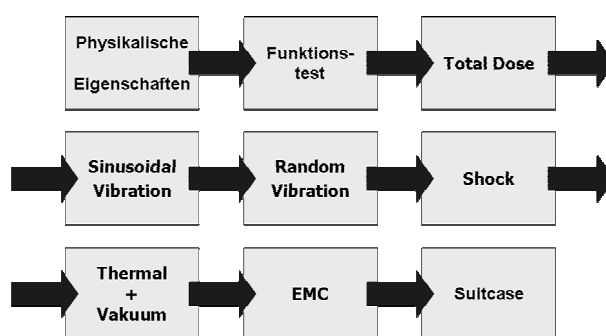


BILD 7. Testreihfolge bei der Weltraumqualifikation

Die Testparameter wurden entweder basierend auf Modellrechnungen (z. B. Total Dose) gewählt, oder sie richteten sich an vorgeschriebenen Normen und Raketenparameter aus[3].

Alle für die Qualifikation vorgesehenen Tests wurden bestanden.

5. BETRIEBSKONZEPT

Eines der Ziele des HISPICO Projekts war neben der höchsten Miniaturisierung und enorme Steigerung der Effizienz, eine Senkung der Herstellungs- und Betriebskosten.

Durch den Einsatz von COTS Bauteilen, konnten die Herstellungskosten niedrig gehalten werden. Für den Betrieb des Transmitters musste jedoch eine eigene entwickelte Lösung ausgearbeitet werden, die nicht nur geringe Betriebskosten, sondern auch eine hohe Mobilität gewährleisten sollte. Aus diesem Grund wurde für HISPICO ein dementsprechender Receiver entwickelt. Er sichert, durch genaue Anpassung an den Transceiver einen effektiven Empfang der Daten und bietet durch seine Abmaße höchste Mobilität ($150 \times 180 \times 30 \text{ mm}^3$). Beim Aufbau einer Bodenstation für HISPICO kann der Receiver direkt an die Antenne angeschlossen werden und benötigt kein zusätzliches Downconverting. Für den Betrieb wurden zunächst drei Modi vorgesehen (BILD 8), wobei der Betriebsmodus drei wegen hoher Kosten und technischen Aufwand nicht zum Einsatz kommt.

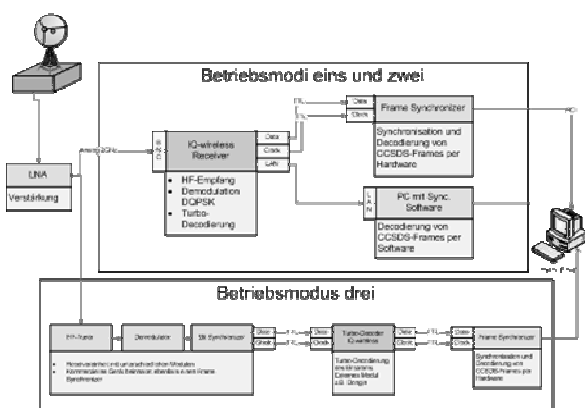


BILD 8. Betriebsmodi des Systems

Betriebs Modi eins und zwei werden mit dem HISPICO Receiver betrieben. Der Receiver stellt dem Benutzer die Daten nach dem Empfang, der Demodulation und Dekodierung über eine Ethernetschnittstelle zur Verfügung. Betriebsmodus zwei stellt bei Bedarf zusätzlich eine TTL-Schnittstelle zur Verfügung.

Mit Hilfe dieser Lösung ist es möglich, mit geringem Aufwand eine mobile Bodenstation aufzubauen. Werden mehrere Bodenstationen benötigt, können die Daten problemlos während des Überfluges über das Internet von mehreren Bodenstationen zur Verfügung gestellt werden.

6. ERGEBNIS UND AUSBLICK

Im Rahmen des HISPICO Projekts, erfolgreich abgeschlossen Ende 2007, wurde durch Kooperation zwischen der Technischen Universität Berlin und der Firma IQ wireless ein S-Band Transmitter für den Einsatz

auf einem Pico-Satelliten entwickelt. Er besitzt die geometrischen Abmaße von $95 \times 46 \times 15 \text{ mm}^3$ und ein Gewicht von 0,11kg, womit das erste Ziel die Miniaturisierung des Gerätes erreicht wurde.

Ein weiteres erreichtes Ziel war trotz eines geringen Leistungsverbrauches von 5W und einer Sendeleistung von 1W, eine Übertragungsrate von 1Mbps zu erreichen. Dabei beträgt die Fehlerrate 10^{-6} . Um diese Parameter zu erzielen, kam ein modernes Kanalkodierverfahren (TURBO-Code) zum Einsatz, das bis heute nur auf großen Missionen bzw. auf DeepSpace Missionen verwendet wurde. Die Effizienz wurde durch das Modulationsverfahren DQPSK noch weiter gesteigert.

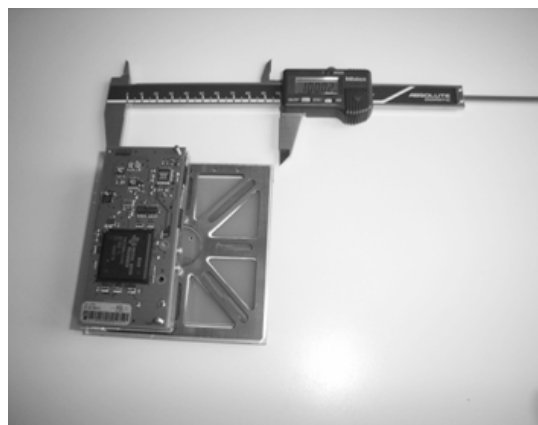


BILD 9. HISPICO

Da der Transmitter beim Einsatz im Weltraum und dem Transport auf einer Rakete einer Reihe von Belastungen ausgesetzt ist, musste dieser auf seine Raumfahrttauglichkeit hin getestet werden. Im Rahmen eines Testprogramms wurde das Qualifikationsmodell des Transmitters auf unterschiedliche Belastungen getestet. Damit konnte nachgewiesen werden, dass die Funktionalität trotz hoher Belastung nicht beeinträchtigt wird. Als nächstes muss HISPICO unter Realbedingungen, das heißt am Bord eines Satelliten verifiziert werden.

Die Entwicklung eines solchen Transmitters eröffnet für die zukünftige Missionen neue und attraktive Möglichkeiten. Für Pico-Satelliten bedeutet dies leistungsfähigere Nutzlasten, da der beschränkende Faktor hohen Datenaufkommens wegfällt. Als Beispiel kann an dieser Stelle Erdbeobachtung genannt werden. Mit Hilfe eines hochratigen Transmitters können hochauflösende Bilder binnen eines Überfluges zur Bodenstation übertragen werden.

Die Kosten der zukünftigen Missionen können bei gleicher Leistungsfähigkeit gesenkt werden, indem Unabhängige Pico-Satellitenschwärme zum Einsatz kommen. Dabei spielt die Kommunikation zwischen den Satelliten und zur Bodenstation eine wichtige Rolle.

Denkbar ist auch der Einsatz von HISPICO auf miniaturisierten Rover zur Mond- oder Planetenerkundung. Dabei kann der Rover mit Hilfe von HISPICO mit einem Lander oder dem Orbiter kommunizieren.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Satellitenkommunikation; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007; Hans Dodel, Sabrina Eberle
- [2] Satellite platform design; Peter Berlin. - Universities of Lulea and Umea, 2005
- [3] HISPICO-Hochintegrierter S-Bandsender für Pico-Satelliten; Endbericht 2008, Rozbeh R. Alavi, Jens Rießelmann

8. ABKÜRZUNGEN

HISPICO	Hochintegrierter S-Bandsender für Pico-Satelliten
QPSK	Quadraturphasenumtastung
DQPSK	Differenzielle-QPSK
BPSK	binärer Phasenmodulation
HF	Hochfrequenz
RHCP	right hand circular polarization
BER	Bit Error Rate
LNA	Low Noise Amplifier
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
LEO	Low Earth Orbit
COTS	commercial off-the-shelf