

TELDASAT – SATELLITENGESTÜTZTE GLOBALE VERNETZUNG DES „INTERNET OF THINGS“ IoT

I. Christofilos, SAT4M2M GmbH, Gilching, Deutschland
M. Haunschild, SAT4M2M GmbH, Gilching, Deutschland
F. Huber, DLR/GSOC, Oberpfaffenhofen, Deutschland
E. Messerschmid, Reutlingen, Deutschland

Zusammenfassung/Abstract

Das Internet der Dinge (IoT) als Grundlage von globalisierten Prozessen, Bereichen wie der Überwachung kritischer Infrastrukturen oder Systemen bis hin zu Industrie 4.0 erfordert die weltumspannende, kostengünstige Vernetzung von Milliarden global verteilter und meist energie-autonom arbeitender Sensoren und Systemen. TELDASAT mit seinen Durchbruchinnovationen und –verfahren stellt unter Einbeziehung der Internationalen Raumstation ISS als Kernelement einer Konstellation von (Piggyback-)Nutzlasten im LEO die erforderliche Infrastruktur dar.

Keywords

Raumfahrt; Raumfahrt Anwendungen, Satellitenkommunikation, New Space, Internet der Dinge / Internet of Things IoT

1 AUSGANGSSITUATION

IoT – IoE – M2M diese Abkürzungen für „Internet of Things – Internet of Everything – Machine-to-Machine“ stellen kritische Bestandteile der globalen Vernetzung von Sensoren für Monitoringaufgaben, Prozessen bzw. Prozessoptimierungen und Verfahren dar, nicht zuletzt als wesentliche Subsysteme bzw. Komponenten von Industrie 4.0. Hierbei wird davon ausgegangen, dass bereits bis zum Jahre 2020 etwa 3 Milliarden global verteilter, stationärer wie mobiler Sensoren vernetzt werden müssen. Terrestrische Systeme, die weltweit lediglich wenige Prozent der betroffenen Regionen abdecken und dabei in Einrichtung und Betrieb sehr kostenintensiv sind, können die Hauptanforderungen wie globale Verfügbarkeit, Kosteneffizienz und Vernetzung energieautonomer Sensoren – s. Abbildung 1 –

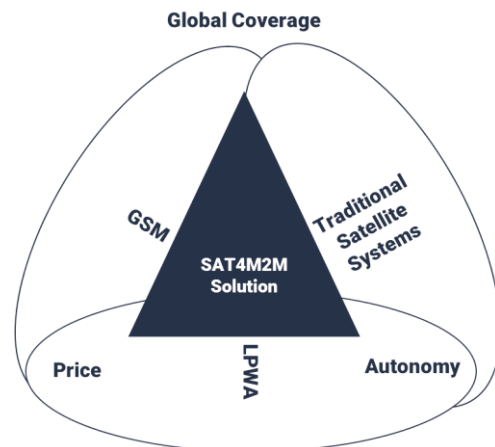


Abbildung 1: IoT Systemanforderungen.

nicht darstellen: Nur die satellitengestützte Komponente zur Sensordatenübertragung ist hierzu in der Lage: TELDASAT.

Da auch terrestrische Systeme wichtige Beiträge zur globalen Vernetzung von Sensoren in Low-Power-Wide-Area LPWA-Netzwerken liefern, jedoch insbesondere in den Bereichen „globale Verfügbarkeit“ und „Kostensensitivität“ deutliche Schwächen aufweisen, wird im Rahmen TELDASAT Kompatibilität

zu derartigen Systemen integriert: Beispiel hierfür ist die Implementierung der Protokolle von SigFox, LoRa, etc. im TELDASAT IoT-Transceiver / SoC.

TELDASAT ist Bestandteil von „New Space“, da es Begriffe „schnelle Umsetzung neuer Technologien – Kosteneffektivität – Kommerzialisierung von Raumfahrt“ etc. hervorragend widerspiegelt; darüber hinaus kann TELDASAT als Bestandteil der Komponenteninitiative des DLR betrachtet werden, da es um die Entwicklung von raumfahrtgestützten wie terrestrischen Subsystemen- und Systemkomponenten geht, welche flexibel skaliert werden können.

2 MARKT/MARKTANFORDERUNGEN

Der Markt für die Vernetzung insbesondere energie-autonom arbeitender Sensoren – Ultra-LPWA – erfährt derzeit einen extremen Wachstumsschub – s. Abbildung 2:



Abbildung 2: Wachstumsraten zu vernetzender Sensoren.

Die Anwendungsbereiche sind dabei extrem vielfältig, sie reichen vom „klassischen“ Containertracking über das Monitoring von Eisenbahngüterwagons bis hin zu Themen wie Infrastrukturüberwachung, neuen Konzepten wie „Maintenance on Demand“ beispielsweise im Bereich Schienennetze, Eisenbahndämme, Brücken, etc., Grenzüberwachung, Umweltmonitoring, Diebstahlsicherung, Prozessoptimierung, u.v.m. – s. Abbildung 3;

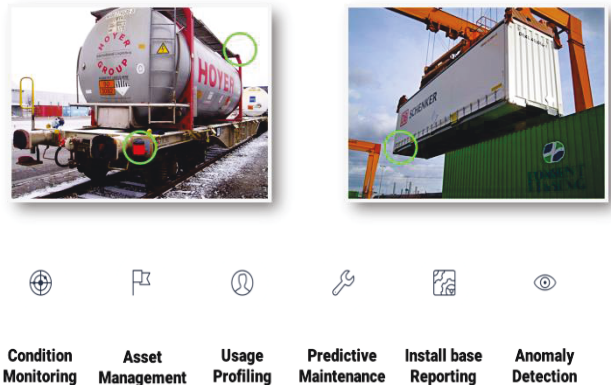


Abbildung 3: IoT – Beispiele für Anwendungsbereiche.

weitere Bereiche sind u.v.a. Pipelinemonitoring oder die Detektion jeglicher Prozess-Anomalien bis hin zum Oberbegriff der Sensorvernetzung im Bereich von „Smart Cities“.

Ein wesentliches Merkmal dieser Sensordaten ist dabei, dass diese Sensoren im Allgemeinen nur sehr geringe Datenmengen – im Wesentlichen Statusinformationen bzw. Informationen über Abweichungen vom vordefinierten Status – übertragen. Dabei ist es nach einer detaillierten Fesability Studie (SatApps) nicht erforderlich, dass diese Information in Echtzeit übertragen wird: Für die meisten Anwendungsfälle stellen mittlere Verzögerungszeiten von 30 Minuten kein Problem für den Systembetrieb bzw. den (End)Kunden dar.

Die Herausforderungen, die der Markt bzw. Kunde an ein derartiges System stellt, sind viel mehr

- Globale Verfügbarkeit
- Geringe Kosten pro Sensor und Datenübertragung
- Energieautonomie im Betrieb (Ultra LPWA, Lebensdauer > 6 a)

3 LÖSUNGSANSATZ – ÜBERBLICK

Die o.g. Anforderungen an ein entsprechendes IoT-Datenkommunikationssystem können nur durch die Einführung einer satelliten-

gestützten Infrastruktur dargestellt werden; die vor allem im Vergleich zu terrestrischen Systemen geringen Kosten für die erforderliche Infrastruktur wie Kleinst-/Mikro-Satelliten bzw. dem Mitflug der TELDASAT-Nutzlast an Bord eines Host-Satelliten und/oder Bodenstationen sowie hochintegrierte Transceiver („GSM for Space“) tragen zum Ansatz des kostengünstigen Betriebs bei bzw. ermöglichen diesen erst. Um die Energieautonomie der Sensoren zu sicherzustellen, muss die Sendeleistung der Sensoren minimal sein, sodass die erforderlichen Satelliten im Low Earth Orbit LEO betrieben werden.

Mit TELDASAT wird genau den Anforderungen der Endnutzer an ein derartiges System entsprochen: Die Sensordaten werden mit extrem niedrigen Energiemengen zum Satelliten übertragen, welcher diese entweder direkt oder zwischengespeichert an entsprechende Bodenstationen überträgt. Da die maximal verfügbare Sendeleistung mit 25 mW sehr gering ist, ist die Senderreichweite auf eine Minimal-Orbithöhe ausgelegt sein: Dem LEO. Die durchgeführten Nutzeranalysen – s.a. „SatApps Feasibility Study“ - die o.g. mittleren „Off-Sets“ von 30 Minuten bestätigt haben – s. Abbildung 4 –, ist hierzu eine „Konstellation“ von lediglich 12 Piggyback-Nutzlasten bzw. Satelliten ausreichend.

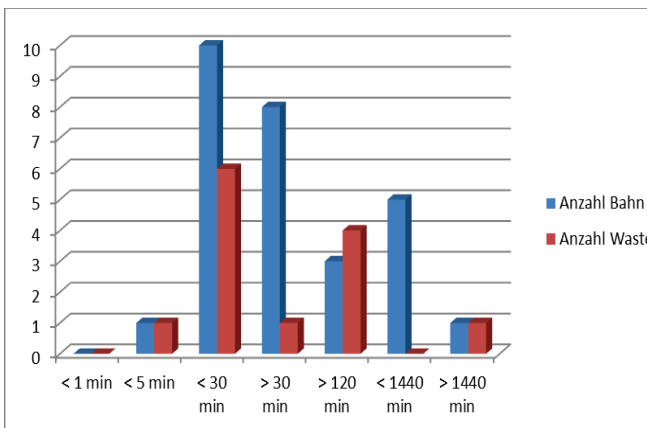


Abbildung 4: Ergebnis SatApps Feasibility Study (Auszug).

3.1 ÜBERBLICK GESAMTSYSTEM

Abbildung 5 gibt einen Überblick über das Gesamtsystem:

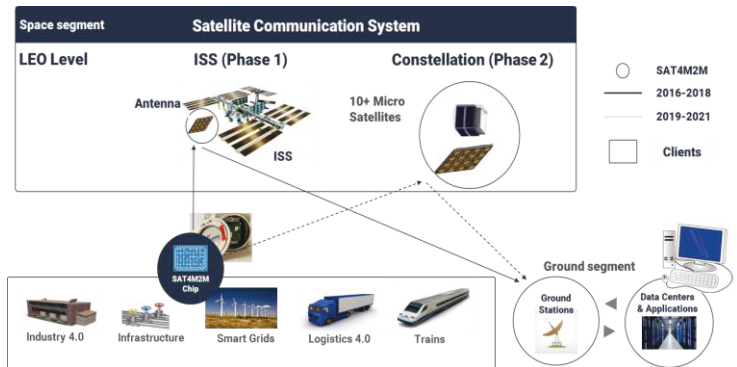


Abbildung 5: TELDASAT Systemüberblick.

TELDASAT besteht aus den wesentlichen Komponenten

- **Nutzersegment:** Mittels eines eigenentwickelten Transceiver-Chipsets SoC (System on a Chip) werden die nutzseitigen zu übertragenden Daten, Statusinformationen, etc. – Bsp. Druck, Temperatur, Beschleunigung, ETA, u.v.m. – vom mobilen oder stationären Sensor-/system nach dessen Aktivierung mittels eines Zeitsignals zum Satelliten übertragen, nachdem das System durch ein GTS II-Signal „aufgeweckt“ wurden; in Phase 1 (Entwicklung) handelt es sich beim „Satelliten“ um die Internationale Raumstation ISS, an Bord derer auf Basis einer Strategischen Partnerschaft mit der ESA das Raumsegment installiert wird. Zur Reduzierung der Offsetzeiten wird in einer zweiten Phase eine Konstellation von (derzeit) 11 Mikrosatelliten + ISS betrachtet, wobei die Unterbringung der Nutzlast an Hostsatelliten ebenfalls untersucht wird.
- **Raumsegment:** Das Raumsegment besteht aus einer vom erfolgreichen GTS-Experiment abgeleiteten bzw. weiterentwickelten Tx-Antenne zur Übertragung des Zeitsignals zur Aktivierung des Nutzersegments, einer speziellen Beam-

forming-Rx-Antenne, einer Speicher-/ Rechnereinheit sowie einem Daten-downlink. In Phase 1 wird die gesamte erforderliche Satelliteninfrastruktur (Energieversorgung, Downlink, etc.) seitens der ISS gestellt bzw. genutzt.

- **Bodensegment:** Das Bodensegment besteht aus einer Reihe von Empfangsstationen, welche mitunter kundenspezifische Anforderungen erfüllen müssen. Die vom Raumsegment empfangenen Daten werden in den Empfangsstationen prozessiert, und die entsprechenden Daten werden dem Kunden entweder als Rohdaten zur Verfügung gestellt (Bsp. Russische Eisenbahn RZD) oder in einem Daten-Prozessierungszentrum kundenspezifisch auf- und/oder weiterverarbeitet.

3.2 SYSTEMKOMPONENTEN „NUTZERSEGMENT“

Das Chipset – auch als Tranceiver oder SoC (System on a Chip) bezeichnet – stellt die zur Datenübertragung vom Sensor zum Satelliten/ISS erforderliche Hardware-Komponente dar; diese Komponente wird derzeit im Rahmen eines von der EU/Horizon 2020 – SME Instrument-Programm unter dem Projekttitel „IoTEE – Internet of Things – Everywhere on Earth“ entwickelt und wird zur ersten Entwicklungsphase an Bord der ISS Ende 2018 zur Verfügung stehen. Das Chipset der SAT4M2M wird dabei derart gestaltet, dass Protokolle terrestrischer Low-Power-Wide-Area-(LPWA)-Kommunikationssystemen wie Sigfox, LoRa, Weightless, etc. berücksichtigt bzw. direkt integriert werden können bzw. werden – s. Abbildung 6.

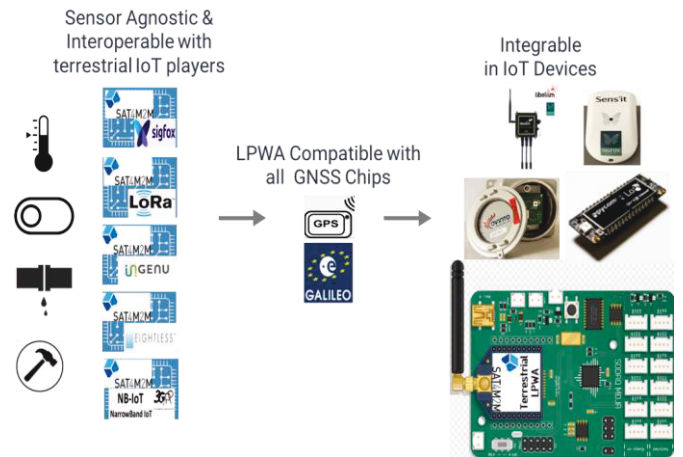


Abbildung 6: TELDASAT Chipset als Bestandteil des Bodensegments.

Um den Anforderungen des energieautonomen Systembetriebs von 6+ Jahren maximal entsprechen zu können, werden derartige Telematiksysteme nur dann zum Aussenden der Informationen aktiviert, wenn sich ein Satellit im Empfangsbereich des Sensors befindet. Dazu wird dieser mittels eines auf GTS-Technologie beruhendem Zeitsignals aktiviert (GTS Frequenz 400,15 MHz). Nach der erfolgreichen Aktivierung wird die Information im global verfügbaren ISM Frequenzband (Europa/Asien: 868 MHz) zum Raumsegment übertragen. Die wesentlichen dabei zur Anwendung kommenden Verfahren sind Spread Spectrum und CDMA.

Die Spread-Spektrum-Technologie verwendet im Allgemeinen eine sequentielle, dem Rauschen ähnliche Signalstruktur, um das normalerweise schmalbandige Informationssignal über ein relativ breitbandiges Band von Frequenzen zu verbreiten. Eine Sinuswelle wird pseudo-zufällig mit einer kontinuierlichen Folge von Pseudo-Rauschen (PN) –Codesymbolen, genannt "Chips", gemischt, wobei jedes Codesymbol von kürzerer Dauer als das Informationsbit ist. Jedes Informationsbit wird durch eine Folge von viel schnelleren Chips moduliert. Daher ist die Chiprate viel höher als die Informationssignal-Bitrate. Die Signalstruktur, in der die Folge der Chips vom Sender erzeugt wird, ist dem Empfänger

bereits bekannt. Der Empfänger verwendet die gleiche PN-Sequenz, um dem Effekt der PN-Sequenz auf dem empfangenen Signal entgegenzuwirken, um das ursprüngliche Informationssignal zu rekonstruieren (Korrelation).

CDMA ist ein Beispiel für Mehrfachzugriff, bei dem mehrere Sender gleichzeitig über einen einzigen Kommunikationskanal Informationen senden können. Dieses Verfahren ermöglicht es mehreren Benutzern, ein Frequenzband zu teilen. Um dies ohne unangemessene Interferenz zwischen den Benutzern zu ermöglichen, verwendet CDMA eine Spreizspektrumtechnologie und ein spezielles Codierungsschema, wobei jedem SoC ein eigener Code zugewiesen wird.

Die mögliche Übertragung über kompatible terrestrische LPWA-Netzwerke wird entweder automatisch oder kundenspezifisch priorisiert. Die maximale Sendeleistung ist, entsprechend den gesetzlichen Vorschriften auf maximal 25 mW begrenzt.

3.3 SYSTEMKOMPONENTEN „RAUMSEGMENT“

Das Raumsegment besteht aus je einer Sende- und Empfangsantenne, der On-Bord-SDR Hardware (Speicher, Prozessor etc.) sowie einen Downlink, um die empfangenen Daten zur Bodenstation zu übertragen.

Sendeantenne Tx: Die Sendeantenne dient zur Aktivierung der Transceiver/SoC, welche sich normalerweise im „Schlafmodus“ befinden; sie arbeitet auf der global verfügbaren, ITU-regulierten GTS-Frequenz von 400,15 MHz, welche zur Übertragung des Zeitsignals bereits erfolgreich auf der ISS (GTS, 2004 bis 2008) geflogen wurde.

Empfangsantenne Rx: Um tausende von Transceivern (> 50.000/s) mit einer Sendeleistung von lediglich 25 mW gleichzeitig empfangen zu können, ist eine spezielle Beamformingantenne erforderlich, um die

entsprechenden Signale, „versteckt“ im Rauschen, empfangen zu können – s. Abb. 7:

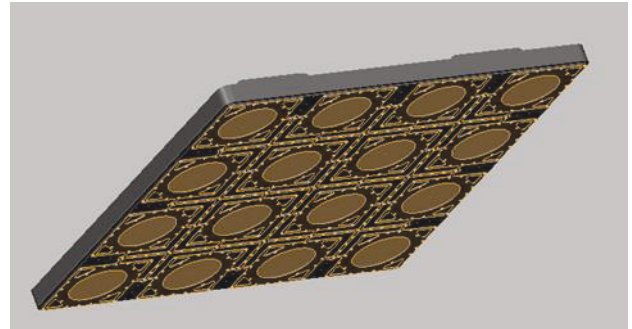


Abbildung 7: Beamforming-Empfangsantenne - Skizze.

Die TELDASAT Empfangsantenne arbeitet im frei verfügbaren ISM-Band, d.h. über Europa bei 868 MHz – s. Abbildung 8;

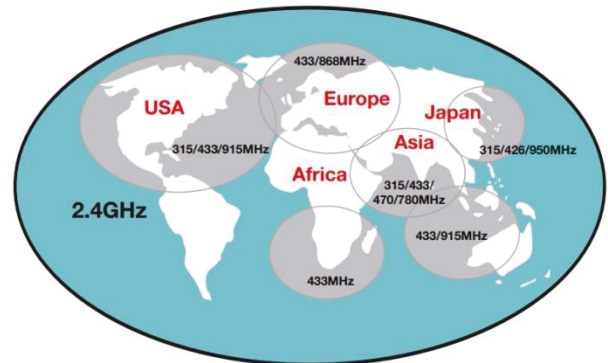


Abbildung 8: Globale ISM Frequenzen (nach G. Reiter).

eine global Anpassung der derzeit noch nicht festgelegten Frequenz für IoT könnte – analog GSM, SigFox, etc. auch global auf 868 MHz erfolgen.

Beide Antennen – Tx und Rx – sind an Bord der Bartolomeo-Plattform außenseitig am Columbus-Modul der ISS montiert werden – s. Abbildung 9:

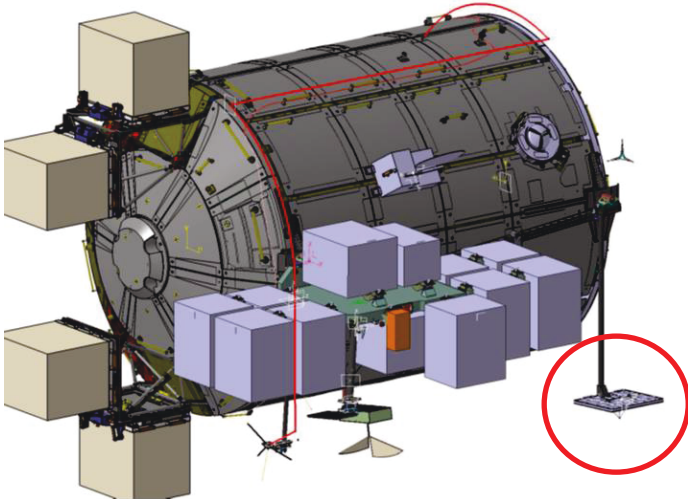


Abbildung 9: Anbringung TELDASAT-Antennen an Bord der Bartolomeo-Plattform (Quelle: Airbus).

Datendownlink: Da an Bord der Nutzlast sehr große Datenmengen anfallen – die eigentliche Prozessierung erfolgt nach dem derzeitigen Projektentwicklungsstand am Boden/ im Bodensegment – wird ein leistungsfähiger Datendownlink erforderlich. Derzeit laufen Untersuchungen, ob dieser Downlink mittels Laserübertragung dargestellt werden kann, andernfalls erfolgt die Datenübertragung voraussichtlich im Ku-Band; während dieses Betriebs an Bord der ISS kann auf den Datendownlink der ISS zurückgegriffen werden

Speicher/Prozessor: Im Rahmen einer strategischen Partnerschaft mit der ESA, welche aus einem CFI hervorgegangen ist, wird die komplette Nutzlast an Bord der ISS weiter- bzw. fertigentwickelt und dabei einer Vielzahl unterschiedlicher Test- und Verifikationsmaßnahmen unterzogen. Dies wird nicht zuletzt dadurch ermöglicht, da sich Speicher und Prozessor innerhalb des Columbus-Moduls befinden.

Generell ist es sekundär, ob die spätere TELDASAT-Nutzlast für den kommerziellen Betrieb als Piggyback-Nutzlast bei einem Satelliten mit Nutzlast-Ressourcen mitfliegt oder

ob ein eigenständiger Satellit die Nutzlast aufnehmen wird; hierzu wird eine detaillierte Kosten-Nutzen-Analyse erstellt, welche die kostenbestimmenden Größen wie Startkosten, Satellitenbus, Bahnkorrekturen, Housekeeping, etc. gerade unter dem kommerziellen Aspekt erfassen und auswerten wird.

3.4 SYSTEMKOMPONENTEN „BODENSEGMENT“

Das Bodensegment besteht im Wesentlichen aus global verteilten Empfangsstationen sowie einer – später eventuell mehreren – Daten-Prozessierungseinrichtung(en).

In den – aus Gründen des kommerzialisierten Betriebs erforderlicherweise – redundant ausgelegten und vollkommen autonom arbeitenden Empfangsstationen werden die von den Satelliten empfangenen Daten empfangen und vorprozessiert. Derzeit ist das Gesamtsystem derart ausgelegt, dass die zu übertragenden Daten das gesamte von der Beamforming-Antenne aufgenommene Rauschen auf den Boden beinhalten und der Beamforming-Prozess an sich erst dort berechnet wird (Korrelation); alternativ kann der Beamforming-Prozess auch an Bord der Satelliten durchgeführt werden, wodurch die zu transferierende Datenmenge deutlich reduziert wird. Dadurch wird jedoch eine deutlich erhöhte Rechnerleistung an Bord des Satelliten erforderlich – dies ist in einem Trade-Off-Prozess weiter zu analysieren und auch davon abhängig, ob die TELDASATR Nutzlast in eigenen Satelliten geflogen oder an Host-Satelliten integriert werden wird, welche gegebenenfalls freie Prozessierungskapazität aufweisen oder aber dedizierte Leistungsbegrenzungen für die Piggybacknutzlast vorgeben.

Die vorprozessierten Daten werden in der Folge via Internet, etc. zu der/den Daten-Prozessierungseinrichtung/-en / Data Center(s) übertragen. Dort erfolgt eine kunden-

spezifische Aufbereitung der entsprechenden Daten und Informationen; diese werden dem Endkunden in der Folge entweder als Rohdaten zur Verfügung gestellt oder aber, abhängig vom Kundenwunsch, weiterverarbeitet. Als ein Ergebnis der o.g. ESA IAP SatApps-Feasibility Study kann festgehalten werden, dass sich viele Endnutzer bereits „windows-fähige“ Auswertungen bzw. Darstellungen ihrer Daten bis hin zu Probability Checks etc. haben wollen

4 ZEITPLAN SYSTEMAUFBAU

Der Projektzeitplan ist einerseits auf die rasante Marktentwicklung für industriell genutzten IoT, andererseits auf die Entwicklungsfortschritte bei den unterschiedlichen Komponenten abgestimmt. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass die ISS auf Basis der Strategischen Partnerschaft mit der ESA vor allem als Entwicklungs- und später als Testumfeld für die komplexe Nutzlast genutzt werden kann: Die Anbringung der Antennen an Bord der Bartolomeo-Nutzlast macht einen gegebenenfalls erforderlichen Austausch der Antenne(n) mittels eines Roboterarms unabhängig von aufwändigen EVA's, und die Unterbringung der SDR-Hardware im Inneren des Columbusmoduls lässt auch HW-Veränderungen/Anpassungen an dieser Komponente im Verlauf der Entwicklungsphase an Bord der ISS durch Astronauten zu; SW-Änderungen werden telemetrisch übertragen. Der Start der Bartolomeo-Plattform ist für Mitte 2018 an Bord einer Space-X geplant.

Das gesamte Entwicklungsprojekt an sich ist in mehrere Unter-Projekte aufgeteilt und wird ergänzend durch Projekte seitens der Anwendungen begleitet werden: Ein Beispiel von der Anwenderseite ist das „SatApps Demo Project“, welches im Rahmen des ESA IAP Programms als Nachfolgeprojekt der entsprechenden, erfolgreich abgeschlossenen SatApps Feasibility Study ab Ende 2017 die Entwicklungen mit Marktinformationen beglei-

ten wird. Parallel läuft die Entwicklung des für die Datenübertragung erforderlichen Transceivers/SoC; die entsprechenden Prototypen werden zum Start der Nutzlast zur ISS verfügbar sein.

5 GESCHÄFTSMODELL

Das TELDASAT Basis-Geschäftsmodell basiert auf zwei Säulen: Dem Verkauf des Transceivers SoC mit den spezifischen Eigenschaften wie Ultra-LPWA, Kompatibilität zu terrestrischen Systemen und der Fähigkeit, auch Sensorinformationen direkt verarbeiten zu können, etc. sowie der eigentlichen Kommunikationsdienstleistung bzw. dem gesamten Systembetrieb – s. Abbildung 10:

SAT4M2M as Satellite-based IoT Telecom Operator



Abbildung 10: TELDASAT Basis-Geschäftsmodell.

Dabei wird erwartet, dass sich das Umsatzvolumen von zunächst 1:2 auf ca. 1:9 verschoben wird. Die Serviceleistungen in den vorgesehenen verschiedenen Leistungsstufen werden dabei als Bestandteil des Systembetriebs betrachtet.

In Ergänzung zum reinen TELDASAT-Geschäftsmodell ist auch beabsichtigt, die entwickelten Systembestandteile als Einzelkomponenten getrennt von TELDASAT am Markt zu etablieren, als Beispiele seien hier die Beamforming Antenne, das Datenmodem oder die Transceiver erwähnt; letztere können unabhängig vom TELDASAT-System

in Telematikeinheiten zur Sensordatenerfassung und -übertragung in terrestrische LPWA-Netze verwendet werden.

6 LITERATURVERZEICHNIS/QUELLEN

TELDASAT Phase A Projekt: DLR Förderkennzeichen 50 YB 1529.

SatApps Feasibility Study: ESA/ESTEC Contract no 4000117155/16/NL/EM.

Gil Reiter: Wireless connectivity for the Internet of Things; Texas Instruments - White Paper, June 2014.