EIGENSCHAFTEN UND ENTWICKLUNG VON KLEINSTSATELLITEN

T. Funke, M. Buscher, A. Patzphal, K. Brieß,
Technische Universität Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt,
Fachgebiet Raumfahrttechnik, Marchstraße 12 10587 Berlin, Deutschland

Zusammenfassung

Anfang des Jahrtausends entwarfen amerikanische Professoren den ‚CubeSat'-Standard, welcher Universitäten einen einfachen und kostengünstigen Zugang zum Weltraum garantieren sollte. Damit wollten sie die Ausbildung der Studenten interessant und praxisnah gestalten und die Forschung vorantreiben. Sie schrieben die Abmessungen und das Gewicht von Kleinstsatelliten fest und entwickelten einen kombinierten Transport- und Auswurfcontainer für den ‚Huckepack'-Start der kleinen Satelliten. Dieser Standard definiert eine vollkommen neue Klasse von Satelliten und bildet die Grundlage für eine rasante Entwicklung, in deren Folge seit 2003 515 Kleinstsatelliten in den Orbit gebracht wurden. Vor allem Universitäten nutzen Kleinstsatelliten in der Studentenausbildung, doch zunehmend entdecken Unternehmen und auch staatliche Institutionen den Nutzen dieser neuen Plattform.

In einem vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) finanzierten Forschungsvorhaben wird diese neue Satellitenklasse genauer charakterisiert. Ihre Fähigkeiten, Entwicklungspotentiale und Einsatzmöglichkeiten, aber auch ihr Stör- und Gefahrenpotential sollen aufgezeigt werden. Hierfür wurden die öffentlich zugänglichen Daten sämtlicher Kleinstsatellitenmissionen seit 2003 mit einem Startgewicht bis 30kg gesammelt und in einer eigens definierten Datenbank gespeichert.

In diesem Paper wird die Analyse der gesammelten Daten vorgestellt. Die Auswertung beleuchtet Entwickler- und Missionshintergründe ebenso wie die zum Einsatz kommende Satelliten-, Kommunikations- und Bodenstationstechnik. Auf Basis der zugrunde liegenden Daten kann gezeigt werden, dass Kleinstsatelliten zu einer ernstzunehmenden Plattform gereift sind, welche als Alternative zu den Großsatelliten vollkommen neue Möglichkeiten bieten und einer breiten Nutzergruppe den Zugang zum Weltraum ermöglichen.

1. EINTEILUNG UND DATENBASIS

Kleinstsatelliten sind zwar eine junge Satellitenklasse, verfügen aber schon über eine sehr große Anhängerschaft und wurden bereits in großer Anzahl erfolgreich ins All gebracht. Nahezu jedes Jahr erhalten neue Nationen durch sie einen Zugang zum Weltraum. Im Verlauf der letzten Jahre sind sie von einer reinen Technologieerprobungsplattform zu einer realen Alternative zu den herkömmlichen Großsatelliten gereift und beginnen, diesen Konkurrenz zu machen (BILD 1).

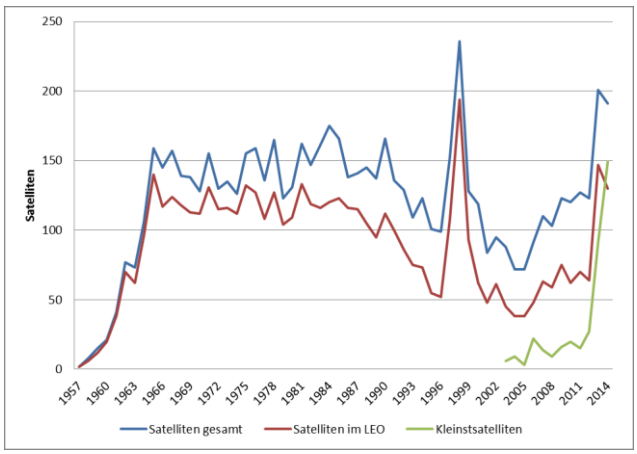

BILD 1. Weltweite Satellitenstarts

Aufgrund ihrer geringen Masse und Dimensionen ergeben sich im Vergleich zu Großsatelliten andere Möglichkeiten, aber auch andere Einschränkungen. Da die Entwicklung der Kleinsatelliten und der Kleinsatellitencommunity relativ jung und deshalb unerforscht ist, wurden in einem Forschungsvorhaben die Kenngrößen von Kleinstsatelliten und ihre Anforderungen untersucht [1][2].

Für die Analyse wurden sämtliche Kleinstsatellitenmissionen seit der Begründung des CubeSat-Standards 2003 untersucht. Zu den betrachteten Kleinstsatelliten gehören nicht nur CubeSats, sondern alle Satelliten, welche ein Startgewicht von 30kg nicht überschreiten. Die Daten zu den Missionen, welche aus einer Vielzahl öffentlich zugänglicher Quellen ([3],[4]) stammen, wurden in einer eigens konzipierten Datenbank [5] gespeichert. Stand der Datenbank für die präsentierten Auswertungen ist August 2016. Es sind alle Missionen enthalten, die bis zu diesem Zeitpunkt gestartet wurden, oder aber gesicherte Startverhandlungen aufgenommen haben[1].

2. ENTWICKLER- UND MISSIONSHINTERGRÜNDE

Für ein umfassendes Verständnis dieser neuen Satellitenklasse soll nicht nur die Technik abgebildet werden, sondern auch die Hintergründe der Entwickler und Missionen. Wer steht hinter der Entwicklung und was sind ihre Beweggründe und Ziele? Um diese Fragen detailliert beantworten zu können, wurden die an den Satellitenprojekten beteiligten Organisationen in vier Gruppen unterteilt. In der ersten Gruppe sind unter dem

[1] 42 (6,9 %) der 610 in der Datenbank gespeicherten Kleinstsatelliten haben einen Starttermin nach August 2016

©2016

Begriff ‚Universitäten' alle Organisationen zusammengefasst, welche vorrangig einen Ausbildungscharakter haben. Die zweite Gruppe enthält alle Organisationen, welche kommerzielle Interessen verfolgen. In der dritten Gruppe sind alle staatlichen Einrichtungen, wie z.B. Institute, Forschungseinrichtungen, Raumfahrtbehörden aber auch das Militär vereint. Die letzte Gruppe der Non-Profit Organisationen enthält Vereine wie die Amateurfunkvereinigung AMSAT oder Privatpersonen.

2.1. Entwickler von Kleinstsatelliten

Der CubeSat-Standard wurde in erster Linie definiert, um Universitäten den Zugang zum Weltraum zu erleichtern und dadurch die Studentenausbildung praxisnaher gestalten zu können. Anhand der Kleinstsatelliten ist es den Studenten beispielsweise möglich, innerhalb einer universitären Laufbahn sämtliche Phasen einer Satellitenmission von den ersten Machbarkeitsstudien bis hin zum Betrieb im Weltraum zu erleben und mitzugestalten. Vorrangig Ausbildungseinrichtungen erkannten daher anfangs in dem neuen Standard auch die Möglichkeit, kostengünstig Forschung zu betreiben und die Ausbildung ihrer Studenten praxisnah und interessant zu gestalten.
Die ersten privaten Unternehmen, die sich mit Kleinstsatelliten beschäftigten, waren Ausgründungen von Universitäten, welche bereits Erfahrungen auf diesem Gebiet gesammelt hatten (z.B. GAUSS, Surrey). Diese Unternehmen vermarkten unter anderem die Nutzlastdaten ihrer Satelliten oder ihre selbst entwickelten Technologien speziell für Kleinstsatelliten. So gibt es inzwischen Firmen (z.B. German Orbital Systems, GOMSpace, Pumpkin, ISIS), welche einzelne Baugruppen bis hin zu kompletten Satellitenbussen anbieten. Dies wiederum erleichtert anderen die Entwicklung von eigenen Satelliten und den Einstieg in die praktische Raumfahrt.
Bei der Betrachtung der Kleinstsatellitenhersteller fällt auf, dass es einen Stamm an „etablierten" Organisationen (ca. 50%) gibt, die regelmäßig Satelliten entwickeln und in den Orbit bringen. Neben dem aktiven Stamm gibt es immer wieder neue Organisationen, die einmalig einen Kleinstsatelliten entwickeln und starten.

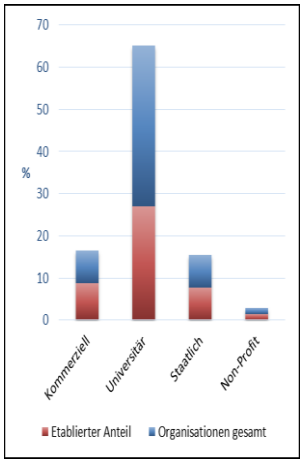

BILD 2. Herkunft der Organisationen

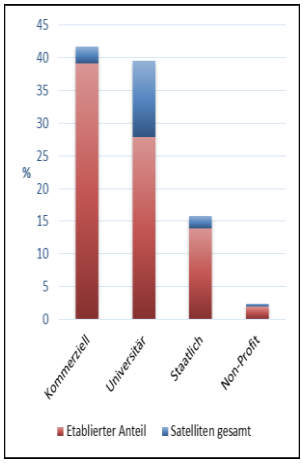

BILD 3. Herkunft der Satelliten

Es ist zudem erkennen, dass zwar über 60% aller Kleinstsatellitenentwickler Universitäten sind (BILD 2), diese aber nur für etwa 40% der Satelliten entwickelt haben (BILD 3). Hingegen sind nur 17% der Entwickler kommerziell, diese haben aber über 40% der Satelliten entwickelt. Auch staatliche Einrichtungen nutzen Kleinstsatelliten und haben mittlerweile einen Anteil von 15% an den existierenden Missionen.

2.2. Herkunftsnationen

Bei der Analyse der Herkunft der Hersteller von Kleinstsatelliten fallen gleich mehrere Besonderheiten auf.
Zum einen kommen die Hersteller aus nahezu allen Teilen der Welt (BILD 4). Neben den großen Industrienationen sind auch viele kleinere Staaten vertreten (derzeit insgesamt 44). Interessant ist hierbei besonders, dass einige dieser Nationen über kein eigenes Raumfahrtprogramm verfügen. Dort sind die zumeist universitären Kleinstsatelliten die ersten nationalen Satelliten im Orbit überhaupt.

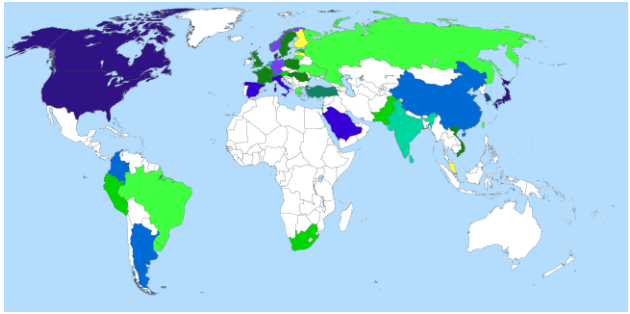

BILD 4. Herkunft der Kleinstsatellitenentwickler[2]

Ebenfalls auffällig ist, dass die Zahl der Hersteller stetig steigt. Zu Beginn war die Entwicklung von Kleinstsatelliten die Domäne einiger weniger Herstellernationen (USA, Japan, Saudi Arabien). Inzwischen hat sich dieses Bild jedoch deutlich gewandelt. Jedes Jahr kommen die meisten Satelliten zwar immer noch aus den USA, aber spätestens seit dem Jahr 2012 werden die gestarteten Kleinstsatelliten von einer Vielzahl unterschiedlicher Nationen entwickelt.

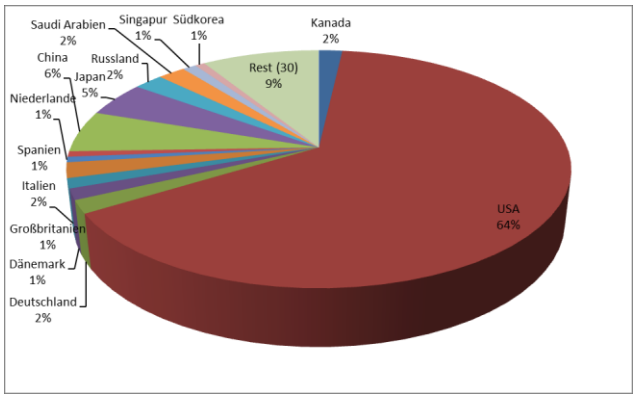

BILD 5. Herkunftsnationen[3]

Die größten kommerziellen Entwickler, die alleine bereits mehr als 170 Satelliten gestartet haben, kommen aus den USA. Betrachtet man hingegen nur die Herkunft der

[2] Je heller der Farbton, umso später hat diese Nation ihren ersten Kleinstsatelliten gestartet.
[3] Unter dem Punkt ‚Rest' sind alle Nationen mit weniger als 5 Kleinstsatelliten zusammengefasst.

universitären Satelliten, so können direkte Rückschlüsse auf den Umfang staatlicher Förderungen gezogen werden. Obwohl Kleinstsatelliten verhältnismäßig günstig sind, könnten sich gerade die Ausbildungseinrichtungen deren Entwicklung nicht leisten (weitere Informationen hierzu im nächsten Abschnitt).

2.3. Budget

Obwohl Kleinstsatelliten im Verhältnis zu Großsatelliten sehr viel günstiger sind, übersteigen die Kosten oft das Budget der Universitäten für Forschungsvorhaben. Daher werden die Satellitenprojekte häufig von staatlichen Einrichtungen finanziell unterstützt. Auf nationaler Ebene werden viele Vorhaben beispielsweise vom DLR gefördert. In den USA ist in diesem Zusammenhang vor allem das ELaNa Programm (Educational Launch of Nanosatellites) zu erwähnen. Informationen über die Budgetierung von Satellitenprojekten oder deren Finanzierung werden selten veröffentlicht, weswegen hierüber nur wenige Informationen vorliegen. Es lässt sich jedoch feststellen, dass von den 242 in der Datenbank enthaltenen Organisationen 9 als Geldgeber von immerhin 52 Missionen angegeben sind.
Die Zahlen, die zu den kompletten Missionskosten[4] zu finden sind, bewegen sich in der Regel deutlich unter einer Million Euro pro Satellit. So hat beispielsweise die Firma Planet laut öffentlicher Quellen ca. 133 Millionen Dollar für ihre insgesamt 178 Flock-Satelliten aufgebracht, was in etwa 700.000$ pro Satellit entsprechen. In diesem Budget sind jedoch wahrscheinlich auch die Firmengründung, Personalkosten, die Beschaffung sämtlicher Arbeitsmittel und Testeinrichtungen enthalten, wodurch die Kosten für den einzelnen Satelliten niedriger ausfallen dürften. Gerade bei Raumfahrtneulingen liegen die genannten Kosten aus diesen Gründen meist höher als der Durchschnitt.
In Universitäten hingegen fallen vor allem die Personalkosten verhältnismäßig gering aus, da die Entwicklung der Satelliten oft im Rahmen der Ausbildung erfolgt. Dabei werden die Studenten beispielsweise über Abschlussarbeiten kostengünstig integriert. Dementsprechend sind die Startgebühren meist einer der größten Posten. Ein weiterer wichtiger Kostentreiber sind die Tests und die Qualifizierung der verwendeten Hardware. Zumindest Shock-, Vakuum-, Thermal- und Strahlungstests sind auf Systemebene unumgänglich.
Ein Team an der Morehead State University unter Bob Twiggs[5] hingegen hat sich mit dem $50Sat ein sehr ehrgeiziges Ziel gesetzt. Sie wollten evaluieren, ob es möglich ist, einen günstigen Satelliten zu bauen, den sich sogar Schulen leisten können. Es wurden nur Bauteile verwendet, die sich leicht beschaffen lassen, wodurch die reinen Materialkosten ihres Satelliten letztendlich bei nur ca. 250 US Dollar lagen. Start und Qualifizierungskosten sind hier natürlich nicht miteinbezogen. Der $50Sat wurde Ende 2013 gestartet und hat seine Aufgaben im Orbit erfolgreich abgeschlossen. Mit dieser Mission wurde sehr anschaulich gezeigt, dass zumindest simple Missionsziele auch mit einfachsten Mitteln und Bauteilen „aus dem Regal“ („Commercial Off-The-Shelf“ COTS) günstig und erfolgreich entwickelt und betrieben werden können.

[4] Welche Kosten zu den Missionskosten gerechnet werden, variiert zwischen den Missionen. In der Regel sind Material-, Personal-, Test- / Qualifizierungskosten und die Startgebühren enthalten.
[5] Mitbegründer des CubeSat-Standards

2.4. Philosophie

Aufgrund der häufig sehr geringen Ausstattung mit finanziellen Mitteln verfolgen viele Kleinstsatelliten-entwickler (vor allem die Universitäten) eine Design-to-Cost Philosophie. So wird beispielsweise so weit wie möglich bei der Entwicklung auf COTS Bauteile zurückgegriffen. Diese wurden nicht speziell für die Raumfahrt entwickelt, sind demensprechend nicht weltraumqualifiziert und damit in der Beschaffung deutlich günstiger. Oftmals werden auch Komponenten selbst oder mit Kooperationspartnern entwickelt. Die Kosten von Qualifizierungstests auf Bauteil- / Baugruppenebene werden gespart, stattdessen werden die meisten Projekte entsprechend der Modellphilosophie nur auf Systemebene qualifiziert.
Eigene Entwicklungen von Mechanismen, Bauteilen oder -gruppen und die eingesetzten COTS-Elemente werden durch die eigenen Satelliten im Orbit getestet und qualifiziert. Auf lange Sicht lassen sich auf diesem Wege gute Aussagen über die Weltraumtauglichkeit für diese Bauteile treffen. Gerade im Kleinstsatellitenbau etablierte Universitäten können inzwischen auf ein umfangreiches Repertoire an günstigen, weltraumerprobten Teilen zurückgreifen.
Aber auch Unternehmen haben die Technologiequalifikation mittels Kleinstsatelliten entdeckt. Nicht selten treten inzwischen Firmen an Universitäten heran, um in Kooperation z.B. Transceiver, Reaktionsräder oder Sensoren speziell für Kleinstsatelliten zu entwickeln, im Orbit zu testen und damit zu qualifizieren. Da die Anzahl der Entwickler von Kleinstsatelliten stetig zunimmt, existiert auch ein wachsender Markt für diese Bauteile.

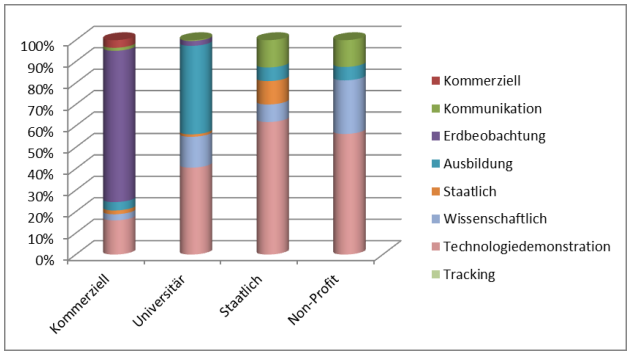

BILD 6. Primäre Missionsziele

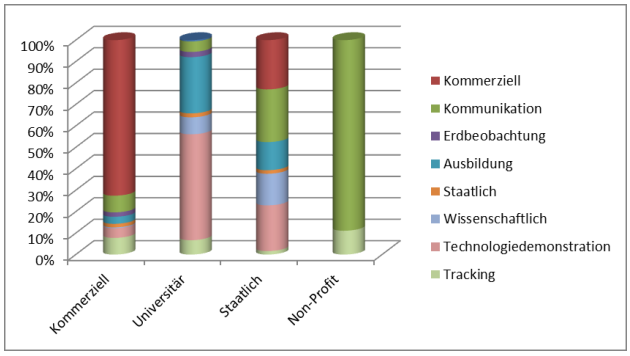

BILD 7. Sekundäre Missionsziele

Die Bedeutung der Technologiedemonstrationen lässt sich direkt aus den in der Datenbank gespeicherten primären und sekundären Missionszielen der Satelliten ablesen (BILD 6 und BILD 7). Circa 80% aller uni-

versitären Satellitenmissionen hat zusammengenommen (primär und sekundär) wenigstens eine Technologiedemonstration als Ziel. Bei staatlichen und kommerziellen Satellitenentwicklern sind 70% bzw. 25% der Missionen Technologiedemonstrationen.
Erwartungsgemäß dienen die Kleinstsatelliten im universitären Bereich zu einem Großteil der studentischen Ausbildung. Bei nur 70 % aller universitären Kleinstsatellitenmissionen ist die Ausbildung als ein explizites Missionsziel angegeben, obwohl in der Realität weitaus mehr Projekte von Studenten mitgetragen werden. Darüber hinaus werden die Nutzlastdaten von mindestens 20% der universitären Satelliten zusätzlich für Forschungszwecke genutzt.
Den überwiegenden Teil von kommerziellen Kleinstsatellitenprojekten nehmen die Erdbeobachtung in all ihren Facetten und die kommerzielle Vermarktung der Nutzlastdaten ein. Schon 2008 hat die Firma RapidEye die Bedeutung von kleinen Satelliten für die kommerzielle Erdbeobachtung erkannt und eine Konstellation von 5 Mikrosatelliten (1x1x1m) in eine Erdumlaufbahn gebracht. Die Idee war es, jeden Punkt der Erde möglichst oft beobachten zu können und gezielt Bereiche für Kunden zu fotografieren. Die Qualität der Aufnahmen reicht zwar nicht an die der großen Erdbeobachtungssatelliten heran, ist aber für die meisten Fälle ausreichend. Dafür sind die kleinen Satelliten günstiger und können nahezu in Serie gefertigt werden. Als Konstellation sind sie viel häufiger als ein großer Satellit in der Lage, einen gewünschten Punkt auf der Erde zu überfliegen und zu fotografieren. Diese Idee wurde von dem Unternehmen Planet aufgegriffen und von den Mikrosatelliten auf Nanosatelliten übertragen. Sie haben 2014 nahezu 100 3U CubeSats als Konstellation in verschiedene, kurzlebige Erdumlaufbahnen gebracht. Jeder beliebige Punkt der Erde kann von ihnen wenigstens 3 Mal täglich überflogen und fotografiert werden. Stets aktuelle Bilder der Erde unterstützen inzwischen die unterschiedlichsten Bereiche wie z.B. Land- und Forstwirtschaft, Städteplanung, Energiewesen oder Infrastrukturkontrollen.
Kommerzielle Kleinstsatelliten werden inzwischen auch oft mit Receivern für das Automatische-Identifizierungs-System (AIS) ausgestattet. Dieses System diente ursprünglich zur Überwachung und Identifizierung von Schiffen in Küstennähe und zur Kollisionsvermeidung der Schiffe untereinander. Die Sendeleistung dieser Systeme ist nicht stark genug bemessen, um terrestrisch weit übertragen zu können, erreicht aber problemlos Satelliten im Orbit. Mit ihrer Hilfe können die weltweiten Schiffsbewegungen überwacht und aufgezeichnet werden. Daneben wird dieses System auch immer öfter eingesetzt, um über Bord gegangene Schiffscontainer aufzuspüren und Warnungen an die Schifffahrt abzugeben. Die Container, welche nicht gleich untergehen, treiben meist kaum sichtbar knapp über der Wasserlinie und sind damit eine große Gefahr für kleinere Schiffe.
Sogar das amerikanische Militär erprobt inzwischen schon Kleinstsatelliten als Kommunikationsrelaisstationen. Der Grundgedanke hier ist vergleichbar mit dem der kommerziellen Erdbeobachtung. Kleinstsatelliten in Konstellation ermöglichen militärischen Einheiten eine ständige Kommunikationsverbindung mit ihrer Einsatzleitung unabhängig von ihrer aktuellen Position.
Satelliten waren bisher Unikate und damit als Spezialanfertigungen sehr teuer. Derzeit scheint sich im kommerziellen Bereich ein Trend zu etablieren, wobei viele Kleinstsatelliten die als kleine Serie und damit kostengünstig gefertigt werden, die Aufgabe eines Großsatelliten unter sich aufteilen. Im Bereich der Erdbeobachtung oder Kommunikation ist der Vorteil einer Konstellation und der damit verbundenen besseren Abdeckung besonders hervorzuheben. Zurzeit ergeben sich immer neue Nutzungsmöglichkeiten, die von den hochaktuellen Daten profitieren. Noch ist daher das ganze Spektrum der kommerziellen Nutzung solcher Daten nicht abzusehen.
Zukünftig wird dieser Trend in Form von Kleinstsatellitenkonstellationen, in welchen die einzelnen Satelliten untereinander kommunizieren, noch neue Dimensionen annehmen. Einige Projekte zur Erforschung der erforderlichen Technologien für Satellitenkonstellationen sind an Universitäten bereits angelaufen (z.B. S-NET an der TU Berlin).

2.5. Entwicklungszeit

Die durchschnittliche Entwicklungszeit bei den Kleinstsatelliten beträgt 34 Monate, was im Verhältnis zu Großsatellitenmissionen sehr wenig ist. Da oft keine Daten zu den realen Entwicklungszeiten in den öffentlichen Quellen zu finden sind, wurde in diesen Fällen immer der Zeitraum vom Start des Projekts bis zum Start des Satelliten gerechnet. Bei der Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Entwicklungszeiträume fällt auf, dass sie in den letzten Jahren immer länger wurden. Die fortschreitende Entwicklung der Kleinstsatelliten und der damit verbundene Anstieg des Komplexitätsgrades, führen zu einer erheblich längeren Entwicklungszeit. Nachfolgeprojekte auf bereits erfolgreiche Missionen nahmen jedoch meist weniger Zeit in Anspruch als der Durchschnitt.

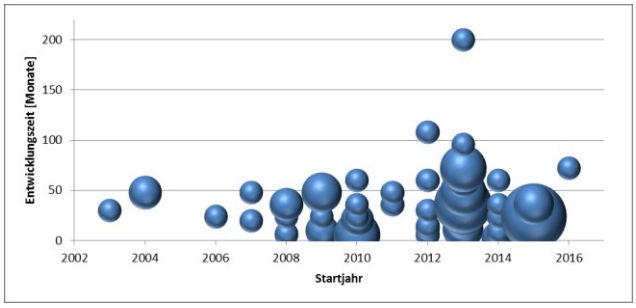

BILD 8. Entwicklungszeit von Kleinstsatellitenmissionen

2.6. Startanbieter

Bei der Entscheidung zum Startanbieter haben die Kleinstsatellitenentwickler meistens keine große Wahlmöglichkeit. Entsprechend ihren Missionsanforderungen kommt nur eine Auswahl an Orbits in Frage. Nicht selten gibt es daher nur eine sehr geringe Auswahl an Startanbietern, welche eine Hauptnutzlast im angestrebten Zeitraum in einen passablen Orbit bringt. Existieren mehrere Möglichkeiten, kommen noch finanzielle Aspekte hinzu. Es ist daher zu erwarten, dass günstige Startanbieter in Indien oder Russland von Kleinstsatellitenentwicklern bevorzugt werden. Wie in BILD 9 zu erkennen, sind jedoch Startmöglichkeiten in den USA mit Abstand der am häufigsten verwendete Zugang zum Weltraum.
Da die meisten Kleinstsatelliten in den USA entwickelt werden und gefördert durch das ELaNa-Programm dort auch am günstigsten gestartet werden können, liegt die Vermutung nahe, dass dieser Umstand das Bild verzerrt. Werden nur Kleinstsatellitenprojekte betrachtet, welche nicht aus den USA stammen, entspricht das Bild den

Annahmen. Global betrachtet sind Dnepr, Antares und Atlas die Trägersysteme, auf denen bisher mit Abstand am häufigsten Kleinstsatelliten mitgeflogen sind.

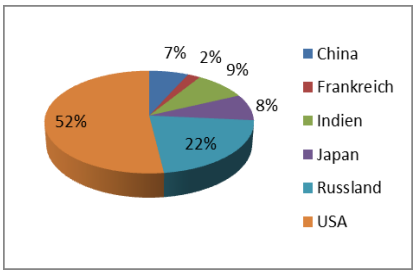

BILD 9. Genutzte Startnationen

2.7. Qualität / Missionserfolg

Wie bereits erwähnt werden viele Kleinstsatelliten von Neulingen im Bereich der Raumfahrt entwickelt und gebaut. Im universitären Bereich sind durch die studentische Beteiligung die Erfahrungen oft noch sehr gering. Auch bei Universitäten, welche bereits Satelliten entwickelt haben, gestaltet sich der Wissenstransfer oftmals schwierig, denn viele der vormals beteiligten Studenten haben ihr Studium in der Zwischenzeit abgeschlossen und stehen damit nicht mehr zur Verfügung. Trotz allem sind 65% der universitären Satellitenprojekte erfolgreich. Werden die fehlgeschlagenen Raketenstarts außer Acht gelassen, sind es sogar 76%. Im Bereich der kommerziellen Satellitenentwicklung können in etwa 70% der Projekte erfolgreich abgeschlossen werden. Bei Nichtberücksichtigung der Raketenfehlstarts sind hier sogar fast 90% der Kleinstsatellitenmissionen erfolgreich. In diesem Bereich liegen auch die staatlichen Missionen (BILD 10).

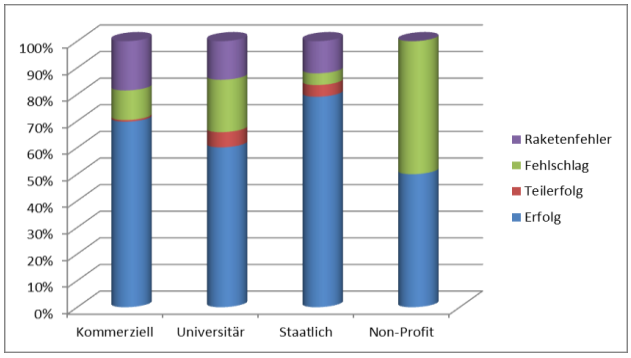

BILD 10. Missionserfolge

Es muss an dieser Stelle jedoch bemerkt werden, dass äußerst selten genaue Informationen zum Erfolg oder Misserfolg einer Mission vorliegen. Es ist daher anzunehmen, dass die Zahl der fehlgeschlagenen Missionen höher ist als angegeben.
Genaue Ausfallursachen von fehlgeschlagenen Missionen werden oft nicht in Gänze veröffentlicht. Dies mag zum einen daran liegen, dass die Satellitenentwickler Fehler ungern in der Öffentlichkeit zugeben und zum anderen daran, dass nicht alle Ausfallursachen restlos aufgeklärt werden können. Bei der Recherche ist aufgefallen, dass die Satellitensoftware überproportional oft als Grund für Misserfolge aufgeführt wird, gefolgt von Problemen im Energieversorgungssystem und Separationsschwierigkeiten.

3. SATELLITENTECHNIK

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Satellitenbussen und der eingesetzten Technik. Neben typischen Kleinstsatellitenkonfigurationen, die anhand ihrer Masse bzw. Dimensionen klassifiziert werden, wird auf das Energiesystem, die Lagebestimmung und -regelung, die Sensorik, Deorbit-Mechanismen und die Antriebstechnik eingegangen. Abschließend werden die nationalen Fähigkeiten auf diesen Gebiet aufgeführt.

3.1. Konfiguration

Wie eingangs erwähnt wurde, lassen sich Kleinstsatelliten in verschiedene Klassen unterteilen und anhand ihrer Konfigurationen gruppieren.

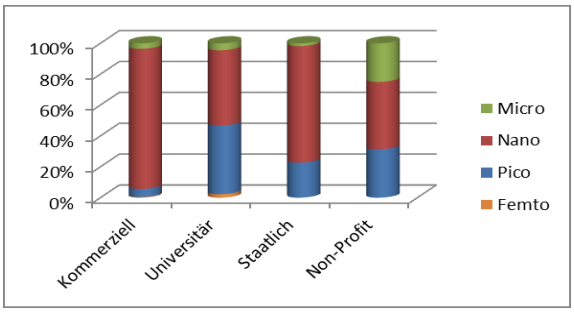

BILD 11. Bevorzugte Satellitenklassen

Staatliche und kommerzielle Satellitenentwickler haben meist anspruchsvolle Ziele und verfügen neben der erforderlichen Erfahrung über die finanziellen Mittel, um diese Ziele zu erreichen. Daher ist es nicht überraschend, dass sie die Klasse der Nanosatelliten gegenüber den günstigeren Picosatelliten bevorzugen (BILD 11). An Universitäten hingegen werden hauptsächlich 1U CubeSats genutzt (BILD 12), die sich aufgrund ihrer geringeren Komplexität am ehesten in die Lehre integrieren lassen.

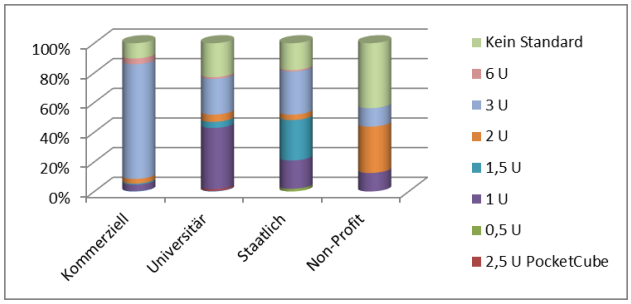

BILD 12. Kleinstsatellitenkonfigurationen

Wird die zeitliche Entwicklung der Kleinstsatellitenkonfigurationen betrachtet, wurden nach der Definition des CubeSat-Standards anfangs hauptsächlich Satelliten der 1U Konfiguration entwickelt. Hierbei ging es meistens um eine erste Umsetzung der CubeSat Design Spezifikationen. Mit der Erprobung dieses Standards rückte jedoch die Integration von leistungsstärkeren Nutzlasten in den Focus, wodurch die Kleinstsatelliten allmählich größer wurden. Der Trend geht inzwischen hin zu Triple Unit CubeSats. Diese machten im Jahr 2014 bereits mehr als 60% der gestarteten Satelliten aus. Die ersten Missionen beschäftigten sich hauptsächlich mit den erforderlichen Technologien für die Kleinstsatelliten und erbrachten mit

vielen entsprechenden Demonstrationsmissionen den Nachweis der Funktionstüchtigkeit. Eine Vielzahl der erforderlichen Technologien wurde auf diese Weise in den letzten Jahren erfolgreich entwickelt, miniaturisiert und eingesetzt. Die größten Fortschritte waren im Bereich der Energiegewinnung (Solarzellen), der Lagebestimmung (Sensorik), Lageregelung und Kommunikation zu verzeichnen. Hier kann inzwischen auf im Weltraum geprüfte und verifizierte Technologien zurückgegriffen werden, wodurch sich viele Kleinstsatellitenentwickler auf neue Forschungsbereiche konzentrieren können. Nutzlasten mit realem Forschungshintergrund erfordern jedoch mitunter mehr Raum und vor allem mehr Energie. Daher sind heutzutage die Triple CubeSats die bevorzugte Konfiguration. Ein Ende des Kleinstsatellitenwachstums scheint aber noch nicht erreicht zu sein. Schon 24% der für das Jahr 2017 geplanten Satelliten sind 6U CubeSats.

3.2. Energieversorgungssystem

Die technische Entwicklung der Kleinstsatelliten lässt sich gut am Energiebedarf der Systeme ablesen. Den meisten Kleinstsatellitensystemen ist gemein, dass sie für die Energiegewinnung auf allen Seitenflächen mit Solarzellen bestückt sind. In der Regel ist dies vollkommen ausreichend für den Nominalbetrieb der Kleinstsatelliten. Größere Satellitenbusse bieten mehr Raum für Experimente, sie bieten aber auch mehr Fläche für Solarzellen zur Energiegewinnung. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Kleinstsatelliten steigt auch der Energiebedarf. Durch den wachsenden wissenschaftlichen Anspruch werden vermehrt komplexe Experimente und Nutzlasten integriert. Diese generieren mehr Daten, die zum Boden übertragen werden müssen. Dadurch sind wiederum ein besseres Kommunikationssystem, ein anderes Modulationsverfahren und mehr Sendeleistung essentiell. Mitunter wird sogar eine gezielte Ausrichtung des Satelliten erforderlich. Lageregelungssysteme oder gar Antriebe sind in erster Linie energieintensiv.

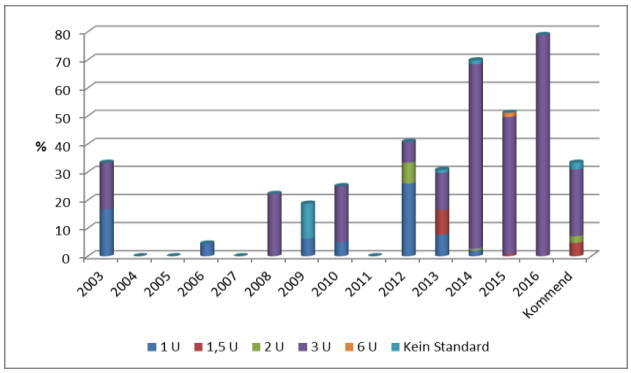

BILD 13. Einsatz entfaltbarer Solarpanele

Die Daten zu den Energieversorgungssystemen sind in öffentlichen Quellen nur selten enthalten, oder in schlecht vergleichbarer Form angegeben. Um dennoch Aussagen zum Energieverbrauch treffen zu können, wurden die Solarpanele näher betrachtet.
Reichen die fest an den Außenseiten der Satelliten befestigten Solarzellen für die Energieversorgung nicht mehr aus, werden Satelliten mit entfaltbaren Solarpanelen ausgestattet. Durch diese Maßnahme kann zum einen die Fläche zur Energiegewinnung vergrößert werden, zum anderen ist es möglich, die Ausrichtung der Panele zur Sonne zu steuern und damit eine bessere Energieausbeute zu erzielen.
In BILD 13 ist sehr gut zu erkennen, dass ein steigender Anteil an Kleinstsatelliten mit entfaltbaren Solarpanelen ausgestattet wird.

3.3. Lagebestimmung und -regelung

Neben der Ausrichtung der Solarpanele zur Sonne, haben immer mehr Kleinstsatelliten Nutzlasten an Bord, die eine Ausrichtung erfordern (z.B. Kameras). Ebenso erfordert auch die gerichtete Kommunikation mit den Bodenstationen eine kontrollierte Lagebestimmung und Lageregelung. Es ist daher zu beobachten, dass bei einer steigenden Zahl von Satelliten Einfluss auf die Lage im Orbit genommen wird.
Ohne Einflussnahme rotiert jeder Satellit unkontrolliert auf seiner Bahn. Soll sich seine Lage im Raum definiert verändern, muss zum einen die unkontrollierte Rotation kompensiert und zum anderen die gewünschte Ausrichtung eingestellt werden. Hierzu kann auf passive Stabilisierungsmethoden sowie aktive Regelungsmechanismen zurückgegriffen werden.

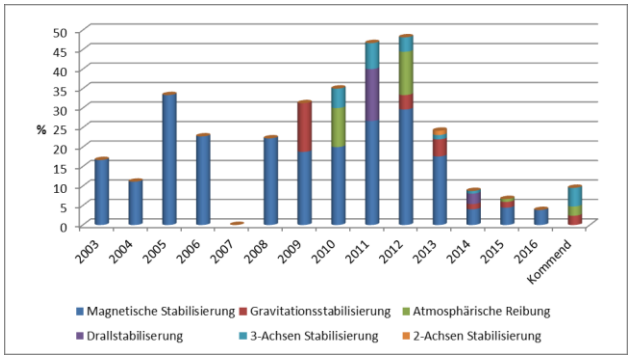

BILD 14. Passive Lagestabilisierung (bei 3- bzw 2-Achsen Stabilisierung sind keine näheren Informationen zur Lageregelung verfügbar)

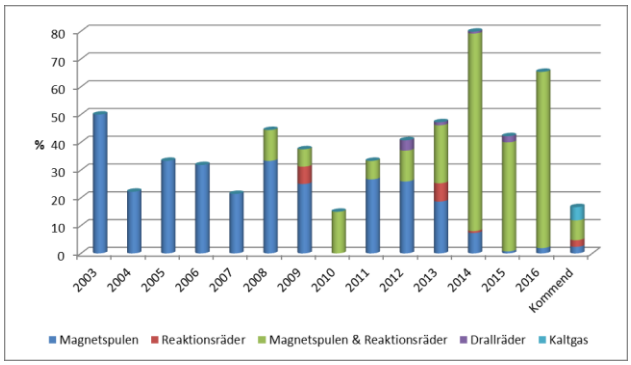

BILD 15. Entwicklung der aktiven Lageregelung

Wie in BILD 14 zu sehen ist, werden schon seit 2003 passive Methoden zur Lagestabilisierung eingesetzt. Hierbei wird am häufigsten auf Magnete zur Stabilisierung des Satelliten auf seiner Bahn anhand des Erdmagnetfelds zurückgegriffen. Diese Methode ist unkompliziert und günstig in der Anschaffung, aber relativ ungenau. Vor allem die Verwendung von Stabmagneten und Hystereseelementen stellen eine größere Herausforderung dar [6].
Seit 2009 werden aber zunehmend andere Methoden der passiven Lagestabilisierung erprobt. Kleinstsatelliten befinden sich hauptsächlich in erdnahen Umlaufbahnen, in denen noch genügend Restatmosphäre vorhanden ist,

um die Reibung zur Bahnstabilisierung zu nutzen. So gab es in den letzten Jahren beispielsweise vermehrt Experimente mit einer ‚Space Dart' genannten Konfiguration. Hierbei werden die Solarpanele ausgeklappt und so angeordnet, dass sie der Befiederung eines Pfeils ähneln, was den Satelliten in 2-Achsen stabilisiert.
Die Lage von Kleinstsatelliten wird aber auch aktiv geregelt (BILD 15). Hier war ebenso lange Zeit die Lageregelung mittels Magnetspulen anhand des Erdmagnetfelds die beliebteste Methode. In den letzten Jahren wurden die Magnetspulen in steigender Zahl mit miniaturisierten Reaktionsrädern kombiniert. Seit 2009 werden die Kleinstsatelliten auch immer öfter passiv stabilisiert und aktiv geregelt.

3.4. Sensorik

Auf Kleinstsatelliten kommen die unterschiedlichsten Sensoren zum Einsatz. Standard in allen Satelliten sind Sensoren zur Erfassung der Zustandsdaten wie z.B. Thermalsensoren und Messpunkte für Spannung und Stromstärke. Darüber hinaus werden auf Kleinstsatelliten viele verschiedene Sensoren zur Lagebestimmung verwendet (BILD 16). Erstaunlich ist der häufigere Einsatz der vergleichsweise komplexen Sternensensoren gegenüber den Sonnensensoren. Ebenso überraschend ist die überdimensionale Beliebtheit der Magnetfeldsensoren. Die Ursachen hierfür sind die unvollständigen Angaben seitens der Satellitenentwickler. Standardsensoren/ –vorgehensweisen sind in Veröffentlichungen vermutlich weniger eine Erwähnung wert, dort sind eher die herausragenden Details enthalten.

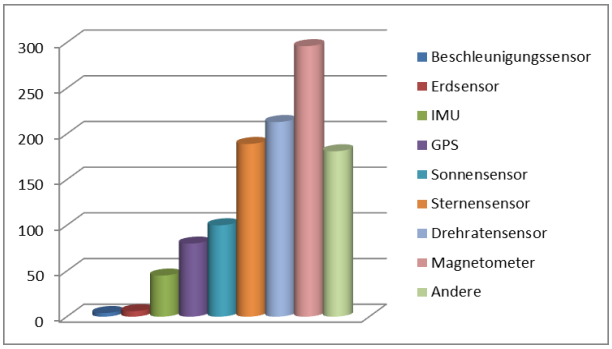

BILD 16. Typen von eingesetzten Lagesensoren

Wie bereits gezeigt wurde, steigen die Anforderungen der Nutzlasten an die Lagestabilisierung und –regelung bei Kleinstsatelliten im Verlauf der letzten Jahre an. Dementsprechend sind auch Lagesensoren bei mindestens 50% aller gestarteten Kleinstsatelliten seit 2011 integriert. Zudem haben Neuerungen in der Spieleindustrie zu einer vermehrten Nutzung dieser Art von Sensorik geführt.
Im Jahr 2006 kamen die ersten Spielkonsolen auf den Markt, welche Bedienelemente mit Beschleunigungs- und Drehratensensoren verwendeten. 2007 wurden der Öffentlichkeit die ersten Smartphones präsentiert, welche neben diesen Sensoren über miniaturisierte GPS-Empfänger verfügen. Spätestens seit der Einführung der Tablet-PCs im Jahr 2010, welche ebenfalls eine Vielzahl miniaturisierter Sensoren verwenden, existiert daher ein ganzer Industriezweig, welcher die Auswahl der verfügbaren Sensorik erweitert, ihre Komplexität vergrößert und ihren Preis deutlich reduziert. Während beispielsweise ein 2009 eingesetzter Drehratensensor nur in einer Achse messen konnte und daher für Messungen in allen 3 Raumachsen dreifach verbaut werden musste, waren bereits 3 Jahre später diese Sensoren nur noch halb so groß, konnten in allen Raumachsen messen und waren zudem genauer und preiswerter.
Nicht nur die Qualität der in Kleinstsatelliten eingesetzten Sensoren zur Lagebestimmung wird besser, auch ihre Vielfalt nimmt zu. Inzwischen sind Sonnensensoren für die grobe Bestimmung der Position und Ausrichtung nahezu Standard, GPS-Empfänger klein und energiesparend und Drehratensensoren hochgenau. Durch die Kombination der Sensoren lässt sich die Genauigkeit erhöhen und die Rechenzeit der Lagebestimmung verkürzen.
Auf Kleinstsatelliten kommen auch wissenschaftliche Sensoren zum Einsatz, welche als Teil der Nutzlast für Experimente benötigt werden. Beispiele hierfür sind:

- Sensoren zur Messung der Mikrowellen-, Röntgen- und hochenergetischen Strahlung,
- Sensoren zur Analyse des Weltraumwetters,
- Staub- und Partikelsensoren,
- Optische Sensoren,
- Infrarotsensoren,
- Spektrometer und
- Radar- / Lidarsysteme.

Ein Teil dieser Vielzahl an Sensoren ist experimentell und fliegt als Technologiedemonstration auf Kleinstsatelliten mit. Sie kommen aber auch als Bestandteil von komplexen Nutzlastexperimenten zum Einsatz.

3.5. Deorbit-Mechanismen

In Verbindung mit der stetig steigenden Zahl an Kleinstsatelliten, wird oftmals auf das Problem des Weltraummülls verwiesen. Die zunehmende Anzahl von Objekten im niederen Erdorbit erhöht das Risiko von Kollisionen. Kleinstsatelliten tragen zu dieser Problematik durch die hohe Anzahl an Starts pro Jahr maßgeblich bei. Zudem werden oft die hohen Ausfallraten und die geringe Lebenserwartung von Kleinstsatelliten kritisiert. Während die Systeme nur kurze Missionsdauern haben, verweilen sie oft noch lange Zeit nach Abschluss der Mission im Orbit. Außerdem haben die meisten Kleinstsatelliten keinen Antrieb und können demzufolge nach ihrem Missionsende nicht zum kontrollierten Wiedereintritt in die Atmosphäre und damit zum Verglühen gebracht werden.
Bereits im Jahr 2004 wird der „European Code of Conduct for Space Debris Mitigation (ECoC for SDM)" beschlossen. Er legt fest, dass jede unterzeichnende Nation ihr Möglichstes tun muss, um Weltraummüll zu vermeiden. Dazu zählt beispielsweise, dass die Satelliten in erdnahen Umlaufbahnen spätestens 25 Jahre nach Ende ihrer Lebenszeit in der Atmosphäre verglühen sollen. Bei Satelliten nach dem CubeSat-Standard entspricht das einer maximalen Orbithöhe von ca. 600km. Wie in BILD 17 zu erkennen ist, liegen die meisten Kleinstsatelliten ab 2005 in der Nähe oder unter dieser Marke. Zudem ist zu beobachten, dass seit 2007 immer wieder Mechanismen zur Abbremsung der Satelliten und damit der Absenkung ihrer Orbits getestet und auch eingesetzt werden. Am häufigsten wird hierbei die Oberfläche der Satelliten vergrößert. Da das Gesamtgewicht gleich bleibt, ändert sich auf diese Weise nur der ballistische Koeffizient (Verhältnis von Gewicht zur Fläche). Dies bedeutet, dass der Satellit stärker durch die Reibung an der Atmosphäre abgebremst wird und dementsprechend früher verglüht. Da die Reibung in tieferen

Atmosphäreschichten größer ist, ist es nicht überraschend, dass viele dieser Mechanismen in niederen Erdorbits getestet werden. Am häufigsten wird dabei auf aufblasbare Ballone oder ausfaltbare Segel zurückgegriffen.

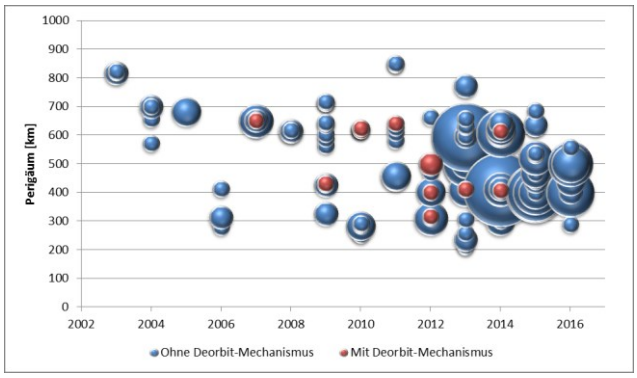

BILD 17. Entwicklung der Orbithöhen

Generell haben diese Deorbit-Mechanismen für Kleinstsatelliten noch nicht die Serienreife erreicht. Sie werden bisher kaum kommerziell eingesetzt und hauptsächlich noch von Universitäten oder staatlichen Einrichtungen erforscht. Immerhin sind sie inzwischen schon so weit miniaturisiert, dass sie sogar auf PocketQubes getestet werden konnten. Da aber dennoch etwas Bauraum verloren geht und sie in der Regel nicht die einzige Nutzlast sind, kommen sie eher auf den Triple Unit CubeSats oder größeren Satelliten zum Einsatz.

3.6. Antriebe

Antriebe sind bei den Kleinstsatelliten derzeit noch kein Standard. Um Antriebe gezielt einsetzen zu können, ist ein funktionsfähiges Lageregelungssystem Grundvoraussetzung. Erst jetzt ist die Entwicklung soweit, dass Antriebe erfolgreich eingesetzt werden können.
Bisher wurden seit 2006 nur bei 31 Systemen, das entspricht 5% aller gestarteten Satelliten, Antriebe integriert. Diese Zahl wird bei zukünftigen Missionen steigen. Die meisten der bisher gestarteten Kleinstsatelliten verwendeten Kaltgasantriebe, Sonnensegel oder elektrische Antriebe. Derzeit sind darüber hinaus interessante neue Systeme in der Phase der Forschung und Erprobung. So profitieren beispielsweise die neuen Sonnensegel und Segelentfaltungsmechanismen von den Forschungen im Bereich der Deorbitmechanismen. Die neuen Segel sind größer als bisher aber auch leichter. Hinzu kommen Forschungen an elektrodynamischen Seilen, an Plasma- und Warmgasantrieben.

3.7. Nationale Fähigkeiten

Auf nationaler Ebene gibt es bisher nur eine geringe Anzahl verschiedener Entwickler von Kleinstsatelliten, dafür haben diese aber bereits viele Satelliten gestartet. Beginnend 2005 mit dem ersten deutschen Kleinstsatellit UWE-1 wurden bisher bereits 12 nationale Satellitenprojekte von 7 verschiedenen Entwicklern in ihren Orbit gebracht. Kommerziell werden in Deutschland bisher noch keine Kleinstsatelliten gebaut, dafür wurden 10 Satelliten von Universitäten entwickelt, ein Satellit vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und einer von einer privaten, nicht kommerziellen Gruppe.

Die nationalen Hauptakteure sind die Universität Würzburg und die Technische Universität Berlin. Während die UWEs vom Lehrstuhl für Informatik der Universität Würzburg entwickelt wurden, kommen die BEESATs [8] vom Institut für Raumfahrttechnik der TU Berlin. Damit sind die Kompetenzen, Anforderungen und Zielsetzungen gänzlich verschieden. Das Hauptaugenmerk von Würzburg liegt auf der zum Einsatz kommenden Software. Sie arbeiten beispielsweise an einer robusten, modularen Bordsoftware (RODOS) und versuchen, das Internet Protokoll (IP) weltraumfähig zu machen. Dies soll in der Zukunft die Kommunikation von und mit Satellitenschwärmen stark vereinfachen.
Die Stärken der TU Berlin liegen in der Miniaturisierung von Satellitenkomponenten und der Entwicklung von eigener Hardware. So wurden beispielsweise in Kooperation mit privaten Unternehmen Reaktionsräder und ein S-Band Transceiver speziell für Kleinstsatelliten entwickelt und mit den BEESATs im Orbit getestet. Eine weitere Kompetenz der TU Berlin ist die Verschmelzung einzelner Bauteile zu Baugruppen, welche eine hohe Integrationsdichte aufweisen. So wird beispielsweise an Seitenpanelen gearbeitet, in welche Solarzellen, ein Sonnensensor, eine Magnetspule, eine Patchantenne und ein Fluiddynamischer Aktuator auf engstem Raum integriert sind.
Mit ihrem First-MOVE hat die Universität München bisher den einzigen deutschen Kleinstsatelliten mit ausklappbaren Solarpanelen entwickelt. Dementsprechend sind sie derzeit die einzige deutsche Universität mit Erfahrungen zu beweglichen Teilen im Orbit.
Generell folgen bisher alle universitären deutschen Kleinstsatelliten dem CubeSat-Standard und haben die Größe von einem 1U. Bei der Kommunikation setzen diese Satelliten fast ausschließlich auf Amateurfunkfrequenzen im UHF Band.
Deutschland ist damit ein wichtiger Bestandteil der Kleinstsatellitengemeinschaft und kann sich im internationalen Vergleich gut behaupten. Auch zukünftig ist Deutschland mit einigen Satellitenprojekten vertreten. Allein von der TU Berlin werden in den nächsten 5 Jahren voraussichtlich 10 Satelliten gestartet (2 TUBiX-20 Satelliten, 4 TUBiX-10 Satelliten [7] und vier „Scheibensatelliten“ (0,25 U). Auch die anderen Universitäten planen Nachfolgeprojekte ihrer bisherigen Missionen (UWE-4, MOVE-II, SOMP 2 etc.). Dabei geht es beispielsweise um die Kommunikationsaspekte von Satellitenkonstellationen / -schwärmen (S-Net) und um Nutzlastanwendungen (z.B. Feuerdetektion bei TUBIN). Viele der kommenden nationalen Satelliten sind keine CubeSats mehr, sondern Nano- und Microsatelliten.

4. KLEINSTSATELLITENBETRIEB

Der Kleinstsatellitenbetrieb ist vor allem durch die satellitenseitigen Kommunikationsfähigkeiten bestimmt. Aufgrund ihrer geringen Größe verfügen Kleinstsatelliten nur über einen begrenzten Bauraum. Durch die geringen Abmessungen ist die Fläche, die ihnen für Solarzellen zur Energiegewinnung zur Verfügung steht, ebenfalls relativ klein. Damit sind alle zum Einsatz kommenden Subsysteme starken räumlichen und energetischen Restriktionen unterworfen.

4.1. Satellitenkommunikation

Diese Einschränkungen gelten auch für die Kommuni-

kationssysteme[6]. Die Entwickler von Kleinstsatelliten greifen daher vorrangig auf die niederfrequenten VHF / UHF Bänder zurück (BILD 18). Kommunikationssysteme für diese Bänder verbrauchen wenig Leistung und erfordern bei einfachen Monopol- oder Dipolantennen keine Antennenausrichtung seitens des Satelliten. Darüber hinaus ist die erforderliche Hardware im Amateurfunkbereich erprobt, günstig und einfach zu beschaffen. Die erreichbaren Datenraten sind in diesen Bändern zwar verhältnismäßig gering, aber vor allem bei frühen Missionen, in denen die Nutzlasten weniger komplex und die Datenmengen überschaubar waren, ausreichend.

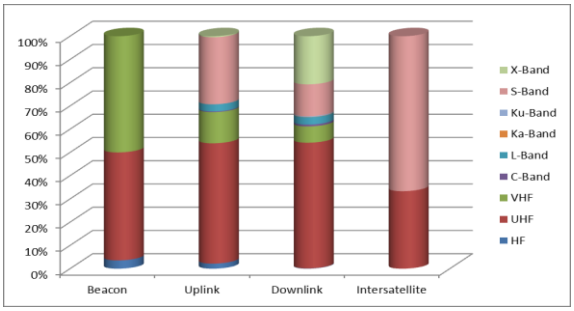

BILD 18. Frequenzbandnutzung

Die bereits beschriebene, fortschreitende Entwicklung der Kleinstsatelliten ist auch gut im Bereich der Kommunikation nachvollziehbar. Die häufiger werdenden komplexen Nutzlasten, welche eine Vielzahl an Daten generieren, erfordern leistungsfähige Kommunikation. Heutzutage ist die Verwendung hochfrequenter Bänder im Downlink wie S- oder X-Band keine Seltenheit mehr.

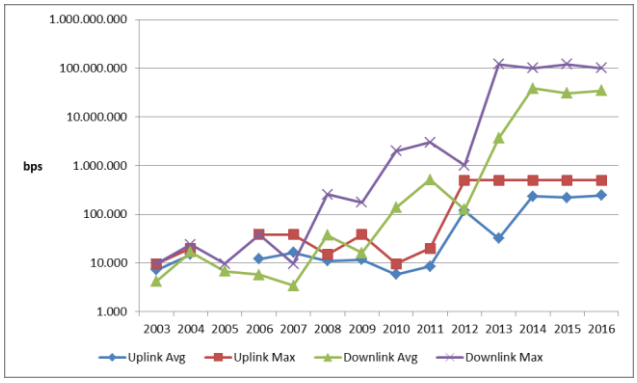

BILD 19. Entwicklung der erzielten Datenraten

Das den kleinen Satelliten mit fortschreitender Entwicklung mehr Energie zur Verfügung steht, ist unter anderem an der steigenden Sendeleistung im Verlauf der letzten Jahre abzulesen. Mit einer höheren Sendeleistung können größere Entfernungen überbrückt werden oder es kann bei gleichbleibender Entfernung die Empfangsqualität gesteigert werden, da sie sich positiv auf das Signal-zu-Rausch Verhältnis auswirkt. Ebenso werden höherwertige Modulationsverfahren möglich, wodurch wiederum höhere Datenraten erzielt werden können. Daher ist eine hohe Sendeleistung meist auch ein Indiz dafür, dass komplexe Nutzlasten mit hohem Datenaufkommen mit an Bord sind.
Mit dem Wechsel in höhere Frequenzbereiche können größere Datenmengen übertragen werden. Doch auch in den bewährten Bändern wird die Kommunikationstechnik weiterentwickelt (BILD 19). Mittels komplexeren, höherwertigeren Modulationsverfahren ist auch hier eine Steigerung der Datenraten möglich.
Die auf Kleinstsatelliten am häufigsten verwendeten Antennen sind im Bereich der VHF / UHF Bänder in der Regel einfache Stabmonopolantennen. Bedingt durch die zum Einsatz kommenden Cubesat-Auswurfcontainer sind diese Stabantennen meist dünne Stahlbänder, welche in der Startphase um den Satelliten gewickelt werden. Im Orbit entfaltet, sind diese oft im 180° Winkel zueinander angeordnet und können damit paarweise als Dipolantennen betrachtet werden. In einer anderen häufig verwendeten Konfiguration sind die Antennen in einem 90° Winkel zueinander angeordnet, wodurch bei frei rotierenden Satelliten die Erreichbarkeit erhöht werden kann. In höheren Frequenzbereichen werden die verwendeten Antennensysteme komplexer. Zumeist werden sogenannte Patchantennen verwendet, da diese hochminiaturisiert sind und sich gut in die Seitenpanele der Satelliten integrieren lassen. Da diese Antennen einen geringeren Öffnungswinkel (bis zu 90°) als Dipolantennen haben, steigen die Anforderungen an das Lageregelungssystem. Alternativ können Patchantennen auch in mehreren Seitenpanelen verbaut werden, wodurch aber Flächen für Solarzellen verloren gehen.

4.2. Bodenstationen

Zur eingesetzten Bodenstationstechnik bei Kleinstsatellitenmissionen gibt es nicht viele öffentlich zugängliche Informationen. In den meisten Fällen beschränken sich die Satellitenentwickler in ihren Veröffentlichungen auf die Beschreibung der Parameter ihres Satelliten. Aber auch anhand der verfügbaren Informationen über die Eigenschaften der Kommunikationsverbindungen ist es möglich, Aussagen über die verwendete Bodenstationstechnik zu treffen. Da viele Kleinstsatellitenentwickler im VHF / UHF Bereich der Amateurfunkfrequenzen ihre Satelliten betreiben, können sie auf deren bewährte Technik oder deren Einfallsreichtum für selbst gebautes Equipment zurückgreifen. Staatliche Kleinstsatellitenprojekte können hingegen meistens die Bodenstationen der Raumfahrtagenturen für den Betrieb ihrer Satelliten nutzen.
Universitäre Kleinstsatellitenentwickler verfügen in der Regel nur über eine eigene Bodenstation für den Betrieb ihrer Satelliten. Oft befindet sich diese in direktem Umfeld der eigenen Räumlichkeiten. Dadurch sind einige Betreiber in der Auswahl der in Frage kommenden Orbits für ihre Satelliten bezüglich der Inklination eingeschränkt.
Mit nur einer Bodenstation befindet sich der Satellit die meiste Zeit außer Reichweite und kann nicht betrieben werden. Durch die wenigen Überflüge sind die Kontaktzeiten pro Tag oft sehr gering und dementsprechend können nicht viele Daten ausgetauscht werden. Dieser zeitlich sehr eingeschränkte Betrieb erfordert daher bei größeren zu übertragenden Datenmengen zwingend leistungsfähigere Kommunikationsmethoden.
Sonnensynchrone Orbits haben die Vorteile, dass sie jeden Punkt der Erde erreichen und zudem immer zu annährend festen Zeiten die gleichen Orte überfliegen. Wie in BILD 20 zu erkennen, sind sie aus diesen Gründen bei Kleinstsatellitenbetreibern sehr beliebt. In der Abbildung offenbaren sich auch noch andere Details. So gibt es generell bevorzugte Regionen im niederen Erdorbit. Satelliten mit einer Orbithöhe von ca. 300km oder

[6] Gilt vor allem für das Antennensubsystem, Verstärker und die Anzahl an zwischengeschalteten Filtern.

weniger sind Kurzzeitmissionen, oft vor dem Hintergrund, Deorbit-Systeme zu testen oder atmosphärische Messungen vorzunehmen.

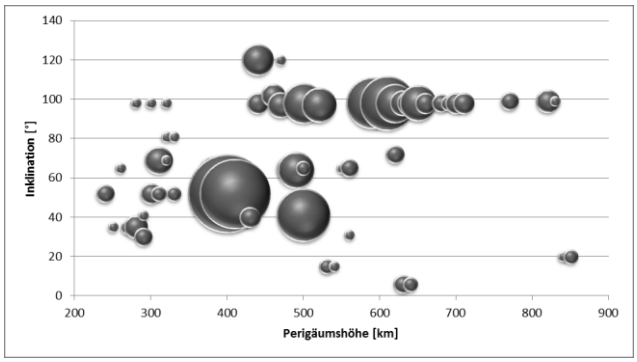

BILD 20. Bevorzugte Inklinationen nach Orbithöhen

Ein weiterer auffälliger Bereich liegt bei 400km und einer Inklination von 52°. Dort befindet sich die ISS von welcher seit einigen Jahren zunehmend Kleinstsatelliten gestartet werden. Darüber hinaus liegt ein auffällig beliebter Orbitbereich bei ca. 500km mit unterschiedlichen Inklinationen, welcher sich wahrscheinlich motiviert durch die begrenzte (gemäß den Anforderungen des Code of Conduct) Verweildauer etabliert hat. Viele Großsatellitenmissionen fliegen auch diesen Bereich an, wodurch sich hier eine Vielzahl von Mitnahmemöglichkeiten bei Raketenstarts ergeben.
Die letzte stark frequentierte Region sind die erwähnten sonnensynchronen Orbits (98° Inklination) mit einer Höhe von ca. 600km, welche sich ebenfalls durch die typischen Orbits der Hauptnutzlasten der Raketen ergeben.
Um die Kontaktzeiten zu verlängern, lassen sich Kleinstsatellitenbetreiber, die im Amateurfunkbereich operieren, auf verschiedene Art und Weise von der Gemeinschaft der Funkamateure helfen. Ihre Satelliten senden beispielsweise in festen Intervallen kontinuierlich Daten und die Betreiber rufen dazu auf, diese aufzuzeichnen und ihnen zuzusenden. Andere kooperieren direkt mit ausgewählten Funkamateuren, welche im Vorfeld mit dem erforderlichen Equipment oder dem Wissen um Telekommando- / Telemetrieaufbau ausgestattet wurden.
Aus den gleichen Gründen finden sich mitunter Universitäten aus möglichst unterschiedlichen Regionen zu Partnerschaften zusammen und unterstützen sich bei dem Betrieb ihrer Satelliten gegenseitig. Im Jahr 2007 rief die ESA das Global Educational Network for Satellite Operations (GENSO) Projekt ins Leben. Mit diesem Programm sollte es Universitäten ermöglicht werden, sich einem globalen Netzwerk aus Bodenstationen anzuschließen. Mit einer einheitlichen Betriebssoftware, welche je nach Bedarf Betriebszeit bei den jeweils überflogenen Bodenstationen reserviert, sollte ein koordinierter allgemeiner Betrieb ermöglicht werden. Je mehr Universitäten sich mit ihrer eigenen Bodenstationen dem Projekt anschließen, umso flächendeckender wäre der Betrieb der Satelliten möglich. Soweit bekannt gab es jedoch kompatibilitäts- und rechtliche Probleme. Seit 2013 wird in den öffentlichen Quellen nicht mehr von diesem vielversprechenden Projekt berichtet, daher ist der aktuelle Stand nicht bekannt. Jedoch waren zwischenzeitlich ca. 30 Bodenstationen an diesem Netzwerk beteiligt.
Kommerzielle Kleinstsatellitenbetreiber schaffen sich mitunter ihr Bodenstationsnetzwerk selbst. Wieder ist hier vor allem Planet zu erwähnen, welche für den Betrieb ihrer Satelliten in 5 Ländern auf 3 Kontinenten automatisierte, gut ausgerüstete Bodenstationen eingerichtet hat.

5. FAZIT

Die Analysen in diesem Paper präsentieren den Stand der Technik von Kleinstsatellitenmissionen. Die Datenbasis wird stetig aktualisiert und erweitert, um auch zukünftige Entwicklungen einzubeziehen. Bei der Analyse der Daten fällt vor allem auf, dass die Kleinstsatelliten in den letzten Jahren einen enormen Reifeprozess durchgemacht haben. Das spiegelt sich in nahezu allen Bereichen der Daten wieder. Inzwischen rücken sie in fast allen Belangen an die Großsatelliten heran. Die Nutzlasten bekommen zunehmend eine wissenschaftliche Relevanz. Die im Vergleich zu großen Satelliten teils schlechtere Qualität der Nutzlasten (z.B. Auflösung der Kameras, Datenrate der Kommunikationssysteme) werden dadurch kompensiert, dass sich Verbände von Kleinstsatelliten die Aufgaben von Großsatelliten teilen und so z.B. Orte auf der Erde öfter überfliegen können. Perspektivisch ist auch eine Kooperation von Groß- und Kleinstsatelliten denkbar. Mit der Zunahme der Nutzlastdaten geht eine merkliche Verbesserung der Leistungsparameter der Kleinstsatellitenkommunikation einher. Vermehrt erfolgt hierbei eine Trennung der Nutzlastdaten von der Kommunikation für TT&C, was der traditionellen Vorgehensweise bei klassischen umlaufenden Großsatelliten entspricht.
Die Kleinstsatelliten sind eine neue Satellitenklasse, die den Schritt von der Technologiedemonstration zur Alternative für Großmissionen geschafft hat. Auch wenn diese Klasse von Satelliten Großmissionen nicht ersetzen kann (und will), bietet sie Raum für Innovation und neue Geschäftsfelder, was sich auch an dem großen und stetig steigenden Interesse kommerzieller Betreiber zeigt.

Schrifttum

[1] M. Buscher, A. Patzphal, T. Funke und K. Brieß, „Small Satellites might go viral - the data proves it," Berlin, 2016.

[2] M. Buscher, N. Winkler, T.Funke und K. Brieß, „Orbital lifetime of small satellites and mitigation of space debris," Berlin, 2016.

[3] B. Klofas, „Klofas.com," [Online]. Available: http://www.klofas.com/. [Zugriff am 01 10 2014].

[4] M. Swartwout, „CubeSat Database," [Online]. Available: https://sites.google.com/a/slu.edu/swartwout/home/cubesat-database#data. [Zugriff am 01 08 2016].

[5] M. Buscher, T. Funke und K. Brieß, „TUB Small Satellite Database," Berlin, 2015.

[6] M. Ovchinnikov, „Attitude Control Systems for Cubesats. Approaches and Methodology, „2nd IAA Conference on University Satellites Missions" Rom, 2013.

[7] M. Barschke, Z. Yoon und K. Brieß, „TUBiX - The TU Berlin Innovative Next Generation Nanosatellite Bus," Berlin, 2013.

[8] F. Baumann, S. Trowitzsch und K. Brieß, „BEESAT - A CubeSat Series Demonstrates Novel Picosatellite Technologies," Berlin, 2012.