

Ohne Reinraum keine Raumfahrt

Vom Wachstum des Raumfahrtmarktes wird eine Branche besonders profitieren: die Reinraumtechnik.

Hubble Telescope © Dittel Engineering/Airbus



Dr. Gernod Dittel



Dr. Berthold Vogt

Die Erfolge von Newcomer-Firmen wie SpaceX zeigen vor allem eins: In der kommerziellen Raumfahrt herrscht Aufbruchstimmung. Nicht nur private Unternehmen, auch staatliche Raumfahrtbehörden haben sich ehrgeizige Ziele gesetzt. Nach Prognosen von Unternehmensberatungen wird sich der Weltmarkt für Raumfahrttechnik in den nächsten 20 Jahren verzehnfachen, von 260 Mrd. EUR (2019) auf 2.700 Mrd. EUR (2040). Von diesem Wachstum werden viele Wissenschaftler, Ingenieure, Zulieferer und Dienstleister profitieren – und Reinraumtechniker. Denn eine Gemeinsamkeit haben fast alle Beteiligten an der Raumfahrt: Einen Reinraum.

In der Raumfahrt sind es kleine Dinge, die große Vorhaben scheitern lassen. Beim Start einer Ariane 4 im Jahr 1990 war es ein Putzklappen in einer Rohrleitung, der den Absturz verursachte. 1994 kam es zu zwei Fehlstarts, weil Verschmutzungen eine Turbopumpe lahmgelegt hatten. So etwas passiert nicht nur der European Space Agency (ESA). Fünf Reparaturmissionen benötigte die NASA, um einen Fertigungsfehler beim Teleskop Hubble auszubügeln. Der Primärspiegel war um einige Mikrometer zu flach geschliffen. Das fand man zu spät heraus, nämlich erst oben. Die Beispiele zeigen die Besonderheit technischer Anforderungen in der Raumfahrt: Aggregate und Satelliten müssen zu 100 % funktionstüchtig sein und bleiben, wenn sie am Einsatzort angelangt sind und für mehrere Jahrzehnte im Orbit einsatzfähig sein sollen. Einmal im All, sind Reparatur und Reinigung meist unmöglich.

Dabei sind selbst kleine Partikel in der Lage, Missionen zu gefährden. Verschmierte Optiken, verschmutzte Lötstellen, unsaubere Lager sind

Schwachstellen, die es zu verhindern gilt. Das haben die Ingenieure auf schmerzhaften wie kostspieligem Weg gelernt, per Fehleranalyse nach Unglücken.

Die wichtigste Konsequenz dieser Lernkurve ist der stetig weiterentwickelte Reinraum. Schon seine Entstehung ist eng mit der Raumfahrt verbunden. Um die deutsche Rakete V2 weiterzuentwickeln, errichteten die Amerikaner zur Montage von Kreisellvorrichtungen einen der ersten technischen Reinräume. Weil die Steuer- und Kontrollfunktionen von Flugzeugen und Raketen immer genauer werden sollten, stieg auch der Bedarf an Präzision in der Fertigung. Somit unterstützte die Weiterentwicklung der Reinraumtechnik die Raumfahrt, ebenso wie diese mit ihren Anforderungen und Budgets Trends setzte für die Reinraumzunft. Die Zuverlässigkeit zu maximieren, also die Ausfallquote bei Trägern und Nutzlast zu senken, ist der wesentliche Beitrag heutiger Reinräume zur Raumfahrt. Satelliten entstehen entlang einer

langen Reinraumkette. Die reicht von der Komponentenfertigung über die Integration bis zum Transport zum Startplatz und ins All. Kritischer Faktor ist neben der Technik immer der Mensch. Er ist die Hauptkontaminationsquelle im Reinraum, gibt er doch pro Minute ein bis 30 Mio. Partikel der Größe $\geq 0,3 \mu\text{m}$ ab. Darum trägt das im Reinraum tätige Personal spezielle Schutzanzüge. Die schützen eher das Produkt, nicht das Personal – anders als Anzüge für Raumfahrer.

Reinheitsanforderungen zwischen Sichtkontrolle und Biohazard

Die höchsten Anforderungen an die Reinheit stellen Flugkörper, die auf anderen Himmelskörpern landen sollen. Sie dürfen weder Partikel noch Keime an Bord haben. Sollten doch Sporen oder Bazillen mitreisen, würden sie bei der Suche nach extraterrestrischem Leben die Messungen verfälschen. Zudem würden sie einen Teil des Weltraumvertrags verletzen, geschlossen 1967 im Vorfeld der Viking-Missionen zum Mars.


Abb. 1: ITC – Airbus Defence and Space

© Dittel Engineering/Airbus


Abb. 2: Qualifizierungsmessungen – Dittel Engineering

© Dittel Engineering

Damals kamen USA und Sowjetunion überein, wenigstens jenseits der Erde Vorsicht walten zu lassen. Kein fremder Planet sollte durch den Eintrag irdischer Flora und Fauna in seiner Entwicklung beeinflusst werden. Dem Grundsatz haben sich inzwischen 110 raumfahrende Nationen angeschlossen. Weil solche Missionen nur selten stattfinden, werden zu ihrer Integration vorhandene Reinräume umgerüstet. In Arbeitspausen töten UV-Strahler Keime in der Luft ab. Baugruppen werden radioaktiv bestrahlt, mit Chlor begast oder über 140 °C erhitzt. Sterilisierungsmaßnahmen werden so lange angewendet, bis ein unterer Grenzwert für die Keimzahl erreicht ist. Eine

komplett keimfreie Integration ist nicht möglich. Darum ist bei Landeeinheiten eine umfassende Sterilisation unvermeidlich.

Am anderen Ende des Spektrums der Reinheitsansprüche steht die Kategorie „Visible Clean“. Diese unterste aller Klassen gibt es in keinem Regelwerk anderer Branchen, nur in der Raumfahrtnorm ECSS-Q-ST-70-01C (European Cooperation for Space Standardization – ECSS). Visible Clean ist ein Standard für Entwicklungslabore, nicht für die Integration. Das Personal wechselt ständig zwischen Labor und Büro, eine Schleuse gibt es nicht. Eine Druckregelung fehlt ebenfalls und die Luftströmung im Raum ist nicht

definiert. Verhindert wird lediglich eine direkte Kontamination durch Straßenkleidung. Räume dieses untersten zulässigen Niveaus können auch als ISO-Klasse 9 oder als grundsätzlich kontrollierter Bereich bezeichnet werden.

Alle höherklassigen Reinräume sind klimatisiert. Ihre Temperatur liegt in der Regel bei 22 °C (± 3 °C) und ihre relative Luftfeuchte bei 55 % (± 10 %). Geregelt Feuchte schützt elektronische Komponenten: Bei trockener Luft kann es zu elektrischen Überschlüssen kommen. Auch ESD-Fußböden (Electro Static Discharge) verhindern Überschlüsse. Zur ESD-Ausstattung gehören ableitfähige Kleidung, Schuhe und Handschuhe,



MopScoop – Die Lösung

Das Dosiersystem mit nachgewiesener Standzeitprüfung

- ⊕ Maximale hygienische und mikrobiologische Prozesssicherheit
- ⊕ Ergonomie und Motivation durch Einsatz von wenig Körperkraft
- ⊕ Moppwahl: Einweg- oder Mehrweglösungen
- ⊕ Variable Wirkstoffwahl und Wirkstoffwechsel

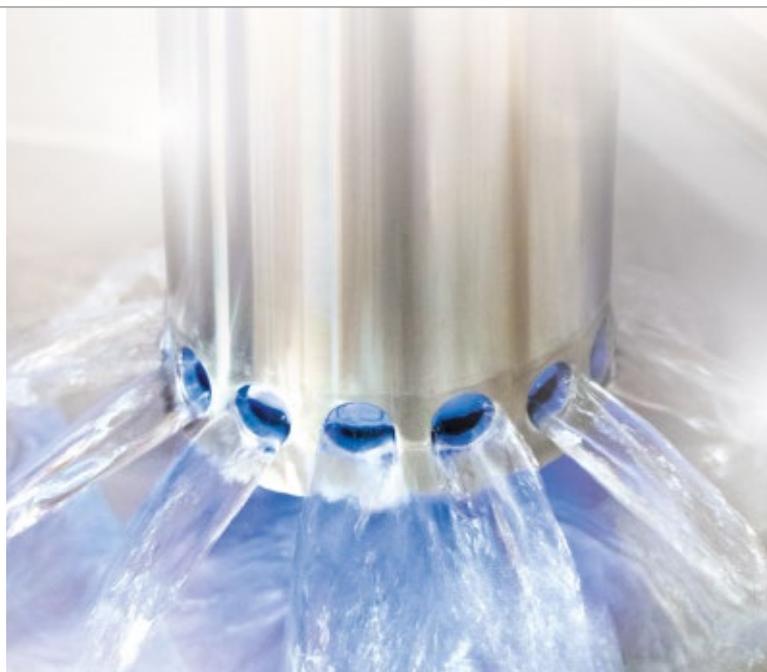




Abb. 3: Partikel auf dem Sonnensegel

© Dittel Engineering/Airbus

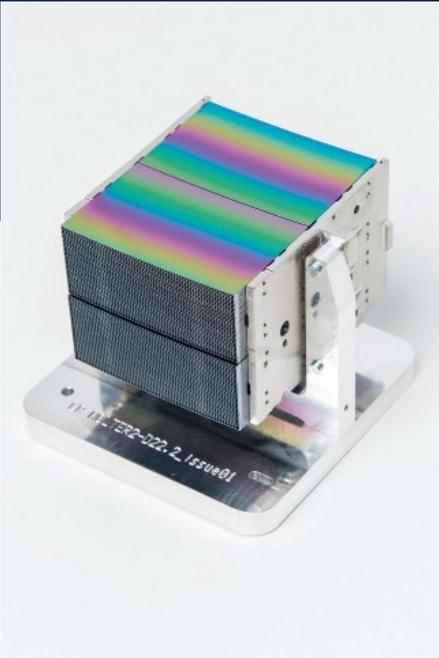


Abb. 4: Spiegelmodul Athena

© Dittel Engineering/Airbus

allesamt geeignet, Spannungen über 100V zu verhindern. Weitere Ausstattungsmerkmale sind speziell ausgestattete Kräne mit gekapselten Antriebseinheiten und beschichteten Bändern. Denn Laufträder erzeugen Antrieb, während geschmierte Tragseile ausgasen.

Mittlere Anforderungen stellen Satelliten, die lediglich elektronische Komponenten wie Radar- oder Kommunikationssysteme an Bord haben. Die meisten Satelliten entspringen Reinräumen der Klasse ISO 7 und ISO 8. Stärkeres Augenmerk verdienen aber ihre sensiblen Komponenten. Auch diese Satelliten sind zur autonomen (autarken) Positionsbestimmung mit Sternensensoren ausgestattet, zudem mit Lageregelungssystemen, die mit Flüssigkeit oder Gas arbeiten. Die Ventile müssen absolut dicht sein. Leckage verkürzt die Lebensdauer. Diese Komponenten sind während der Integration meist abgedeckt.

In ISO-Klasse 8 findet bis zu 40-mal pro Stunde ein Luftwechsel mit konditionierter gefilterter Luft statt. Im Raum herrscht ein Überdruck von 20–30 Pa. Laser-Partikelsensoren wachen darüber, dass nicht mehr als 3.520.000 Partikel der Größe 0,5 µm und 29.300 Partikel der Größe 5 µm/min je m³ in der Luft sind.



Abb. 5: Transportcontainer

© Dittel Engineering/Airbus

Die ISO-Klasse 7 zeigt 352.000 Partikel der Größe 0,5 µm und 2.930 Partikel der Größe 5 µm.

Der Reinraum wird einmal jährlich requalifiziert. Reinraummittel oder -overalls, Reinraumschuhe und Kopfbedeckung sind ebenso obligatorisch wie eine Bartbinde für Barträger. Wer am Fluggerät hantiert, trägt Handschuhe. Bauteile gelangen nur über Schleusen hinein und hinaus. Obwohl es sich um einen Reinraum handelt, ist der Raum nicht staubfrei und muss planmäßig und vorschrittmäßig gereinigt werden. Verunreinigungen lagern sich in beruhigten Zonen am Boden oder auf Flächen ab. Einmal pro Tag wird mit Wischmopp und destilliertem Wasser gewischt.

In einem Reinraum der Klasse 5 werden Satelliten mit extrem empfindlichen optischen Systemen integriert, etwa Aufklärungssatelliten. Partikel auf optischen Oberflächen vergrößern den Streulichtanteil, während molekulare Verunreinigungen eine spektrale Beeinträchtigung bewirken. Eine Reinigung mit einem weichen Pinsel ist aufwendig und kann das Coating verkratzen. Nach dem Waschen können Schlieren zurückbleiben. Vorrang hat daher der Versuch, alle Kontaminationen zu vermeiden.

So soll im Reinraum kein Silikon verbaut sein. Silikon dampft ≥ 20 Jahre lang aus, setzt also Moleküle frei. Ausdünstungen während des Betriebs sind übers Lüftungssystem zu eliminieren. Ideal ist eine vertikale turbulenzarme Verdrängungsströmung von der Decke bis zum Boden. Eine andere Möglichkeit bietet die horizontale Strömung. Die Ausblasfläche besteht aus einem Gitter mit einer großen Anzahl von Filter Fan Units mit Ventilator und endständigem Filter. Oberflächen von Werkbänken / Arbeitstischen sind meistens perforiert, damit die Luft durchströmt, ohne dass störende Verwirbelungen entstehen. Den Reinraum ISO 5 betreten Mitarbeiter über ein Schleusensystem der Reinraumklassen ISO 7/8, wo sie die Kleidung den höheren Anforderungen anpassen.

Trends bei künftigen Satellitenintegrationsräumen

Beim Blick in die Zukunft des Reinraums für die Raumfahrt stechen die höheren Anforderungen und die Kosten heraus. Die Integration eines Satelliten mit rund 5 m Länge benötigt eine Fläche von rund 300 m². Der Quadratmeterpreis liegt bei einer Nutzungsgebühr von mehreren 100 €/d. Somit verschlingen allein die Reinraumkosten schon Millionen. Beim Umgang mit diesen Kosten lässt sich bei kommerziellen Projekten feststellen, dass Mieter tendenziell eine günstigere, das heißt zu niedrige Reinraumklasse wählen oder die Nutzungsdauer verringern. Automatisierung bietet keinen Ausweg, Satellitenintegration bleibt Handarbeit.

Vor allem optische Systeme erhöhen die Anforderungen an Reinräume. Sie sollen immer weiter ins All schauen oder detailreichere Aufnahmen von der Erde machen. Der Mensch sieht derzeit nur einen Bruchteil der geschätzt 10 Mrd. Billionen Sterne. Ein tieferer Blick ins All erfordert präzisere Technologien. Ein Beispiel dafür ist das ESA-Projekt ATHENA, ein Röntgenteleskop mit einer Spiegelkonstruktion aus Millionen mikrometergroßen Siliziumwafern. Auch Miniatursatelliten mit Kantenlängen von gerade mal 10 cm verlangen nach höherer Reinraumqualität.

Je miniaturisierter die Systeme, desto staubempfindlicher sind sie. Solche Satelliten müssen künftig in Räumen der Klasse ISO 5 oder höher integriert werden. Das lässt sich kostenbewusst erreichen, in dem nur für einen abgegrenzten Bereich eine höhere Klasse eingerichtet wird.

Selbst das wird bei Satelliten mit anspruchsvollen optischen Systemen nicht reichen. Bei ihnen stehen nicht mehr nur Partikel im Fokus, sondern Moleküle (AMC – Airborne Molecular Contamination), vor allem organische Bestandteile in der Luft. Wenn ein Mitarbeiter auf ein

Solarpanel auch nur draufatmet, ergibt sich eine messbare Leistungsreduktion. Diese ist dauerhaft, daran ändert eine Reinigung nichts. Moleküle lassen sich mit unspezifischen Aktivkohlefiltern für Zu- und Umluft herausfiltern. Ein Standard welcher bald jeder Reinraum der ISO-Klasse 5 haben wird. Strengere Maßstäbe muss auch die Messtechnik anlegen. Bislang kann nach mehrtägiger Sampler-Exposition nur eine nachträgliche Analyse erfolgen. Um Quellen unverzüglich beseitigen zu können, wäre es nötig, in Echtzeit zu messen.

Transport im mobilen Reinraum

Die Satellitenintegration erfordert eine Vielzahl von Transporten. Das schwächste Glied in der Kette bestimmt die Endqualität. Darum müssen die Konditionen beim Transport die gleichen sein wie bei der Integration. Der Transportcontainer ist im Prinzip ein robuster beweglicher Reinraum der Klasse ISO 8 inklusive Klimakontrolle. Oft wird er mit trockenem Stickstoff geflutet und unter leichtem Überdruck gesetzt. Bevor der Satellitenrumpf von oben oder von der Seite hineingelangt, wird der grob vorgereinigte Transportcontainer in einer Vorschleuse feingereinigt. Satellitenkontakt hat der Container erst in der Hauptschleuse. Sperrige Anbauten wie Solarkollektor und Antennen reisen separat. Beim Transport mit einem Tief-lader dürfen Schocks nur gedämpft übertragen werden. Dazu sind Container und Tragestruktur des Satelliten über Federelemente entkoppelt.

Auf Herz und Nieren wird der Satellit in Testzentren mit großen Reinräumen der ISO-Klasse 7 und 8 geprüft, die nicht an jedem Integrationsstandort zur Verfügung stehen. Der Zugang zu den Testanlagen, in denen Weltraumbedingungen wie Unterdruck, Temperaturszenarien und Vibrationen simuliert werden, erfolgt von einem zentralen Reinraum aus. Auf dem „Shaker“ wird der Satellit etwa durchgerüttelt wie beim Start.

Brachen dabei Bauteile ab, so lassen sich die Befestigungen noch rechtzeitig verstärken bzw. neu konstruieren und dimensionieren. Um die Qualitätsanforderungen an den Reinraum nicht unnötig zu steigern, sind empfindliche Untersysteme abgedeckt. Nach erfolgreichen Tests werden die Satelliten direkt zum Startplatz gebracht, meist per Frachtflugzeug. Ein Transportcontainer für den Lufttransport muss die Anforderungen der IATA (International Air Transport Association) erfüllen. Dazu gehört eine Berstscheibe, die bei abfallendem Kabinendruck für den Druckausgleich sorgt.

Auch am Startplatz muss die Reinraumqualität aufrechterhalten werden. Entweder wird der Satellit in einem Reinraum in eine separate geschlossene Nutzlastkapsel montiert. Den Vorteil der räumlichen Trennung von Integrationsraum und Rakete erkaufte man sich mit einem zusätzlichen Adapter. Eine andere Möglichkeit ist, den Satelliten direkt auf den Träger zu montieren. Dabei ragt die Interface-Ebene des Trägers zur Nutzlast in einen Reinraum, wo der Satellit aufgesetzt und mit einem Klemmring verbunden wird. Bevor die äußere Hülle (Fairing) geschlossen wird, kommt die Kontrolle, ob sich blinde Passagiere eingeschlichen haben. Aber nicht nur diese sind für Kontaminationen verantwortlich, auch die Atmosphäre selbst ist dafür verantwortlich. In Internetforen berichten Techniker von Geckos und Spinnennetzen, die von der Mitreise abgehalten werden mussten, ob durch Stickstoffflutung oder mithilfe eines Staubsaugers. Wenn die äußere Hülle in 100 km Höhe abgesprengt wird, ist die Atmosphäre so dünn, dass keine Kontamination über blinde Passagiere mehr droht.

Reise vom Reinraum auf die Müllhalde

So angestrengt die Menschheit darauf achtet, ihre Himmelsboten im sauberen Zustand hochzuschicken,

so nachlässig geht sie am anderen Ende des Lebenszyklus mit ihren Satelliten um. Ende März 2020 umkreisten 2.700 funktionale Satelliten die Erde, davon 1.300 von den USA. Sie befinden sich jedoch in Gesellschaft von rund 17.000 Satelliten, die kaputt sind oder nicht mehr gebraucht werden. Das ESA-Modell Master-2005 geht von über 600.000 Objekten mit einem Durchmesser größer als 10 mm in Umlaufbahnen um die Erde aus. Andere Simulationen rechnen mit 150 Mio. Objekten in Millimetergröße. Das US-amerikanische Space Surveillance System behält kontinuierlich Objekte ab 50 mm im Blick. Bei Annäherung werden Ausweichmanöver fällig. Auch die Raumstation ISS wird so immer mal wieder zur Kurskorrektur gezwungen. Die Ideen für eine Putzkolonne reichen vom Weltraumstaubsauger bis zum Zerschneiden von Weltraumschrott. Mit welcher Reinigungsmethode auch immer: Es wartet eine Menge Arbeit auf die Raumfahrtnationen, wenn sie im Erdorbit aufräumen wollen. Gelingt es ihnen, vor der Haustür zu kehren, würde das die Bemühung der Menschheit beweisen, sich auf Dauer im Sonnensystem einzurichten – um von hier aus vielleicht später einmal in neue Welten aufzubrechen.

AUTOREN

Dr. Gernod Dittel, Dr. Berthold Vogt

KONTAKT

Dr. Gernod Dittel
Dittel Engineering, Schlehdorf
Tel.: +49 8851 61590 0
g.dittel@dittel-ce.de
www.dittel-engineering.de
















Produkte auf höchstem Qualitätsniveau



dastex
REINRAUMZUBEHÖR

Seit über 40 Jahren Experte im Reinraum

Produzent, Händler und Lieferant –
Ihr qualifizierter Servicepartner hochwertigster
Bekleidungs-systeme und Komplementärgüter.

Wir stehen Ihnen rund um das Thema
Rein- und Sauberraum
mit lösungsorientierten Konzepten zur Verfügung.



Dastex Reinraumzubehör GmbH & Co. KG
Draisstraße 23 | 76461 Muggensturm | DEUTSCHLAND
Tel. +49 (0) 7222 9696-60 | info@dastex.com | www.dastex.com

**Professionelle
Reinraum-Kompetenz**
Reinraumbekleidung | Verbrauchsgüter