



Flugzeug-Recycling

-Neue Ansätze zur Rohstoffrückgewinnung-

Dipl.-Ing. Sebastian Jeanvré

Einleitung	1
Wertstoffpotentiale Flugzeugrecycling	2
Aufkonzentrierung von Altflugzeugen an ariden Standorten	4
Zusammenfassung und Ausblick	5
Quellen	7

Einleitung

Flugzeuge haben sich seit dem Beleg des funktionierenden „schwerer als Luft-Prinzips“ im Jahr 1889 unglaublich schnell in den Größendimensionen und in der Wahl der gewählten und verbauten Werkstoffe entwickelt. Sie stellen heute ein unabdingbares Hauptverkehrsmittels dar und machen die weltweite persönliche Vernetzung und die Globalisierung erst möglich. Der Materialverbund Flugzeug wurde über die Jahre immer komplexer bis hin zum Multimaterialverbund verschiedenster Materialien.

Die Entwicklung der Flugzeuge startete über eine Holz-Stoff-Konstruktion bis hin zum ersten Ganzmetallflugzeug die durch die Entwicklung des Bayer-Prozesses möglich war. Der Trend in den 1950er Jahren ging zum Einsatz von Verbundwerkstoffen, die sich aus verschiedenen Nichteisenmetallen, Eisenmetallen, Kunststoffen, Papierwabenstrukturen, Glasfaser, Holz und Stoffen zusammensetzten (siehe hierzu auch Jeanvré [1]). Der jetzige Trend geht von massenmäßig hauptsächlich verschieden verbauten Aluminiumlegierungen zu neuen Verbundwerkstoffen, die einen erheblichen Anteil der Flugzeugzelle von bis zu 50% Kohlefaser und einen nicht unwesentlichen Anteil an Titan enthalten.

Der genutzte Produktzyklus eines Flugzeugs kann in Regel derzeit bis zu 30 Jahre betragen, was bedeutet, dass die Altflugzeuge die jetzt zurückgebaut werden hauptsächlich in den frühen 1980er Jahren produziert worden sind. Das lässt uns in der Betrachtung der

verbauten Materialien und im Fokus der Sekundärrohstoffgewinnung genug Zeit, um uns auf die neu entwickelten und verwendeten Materialien in Verbundbauweise vorzubereiten und somit auch in Zukunft Stoffkreisläufe effektiv schließen zu können.

Ein langfristiges Ziel sollte es sein, trotz der starken sicherheitsrelevanten Anforderungen, sich im Bereich der recyclinggerechten Produktentwicklung von Flugzeugen einzubringen. Dadurch könnten definierte Recyclingprozesse optimiert werden. Auch der Einsatz von Rezyklat-Substitut ist in diesem Bereich möglich wie z. B. in der Automobilindustrie die Dämm- und Vibrationsmatten. Das Ziel sollte aber im Allgemeinen sein, eine bessere und sortenreinere Aufkonzentrierung der Sekundärrohstoffe für die Industrie zu erreichen, was zu einem optimierten Stoffkreislauf führt.

Wertstoffpotentiale Flugzeugrecycling

Um ein Überblick über das zur Verfügung stehende Materiallager der nächsten Jahre zu erhalten, wurde an der TU Clausthal eine quantitative Erfassung nicht mehr flugtüchtiger Flugzeuge nach Muster und Hersteller angefertigt. Die Auswertung hat gezeigt, dass etwa 24.000 aktive Flugzeuge (über 9 Tonnen Leergewicht) im kommerziellen Luftfahrtbetrieb weltweit in Betrieb sind [2].

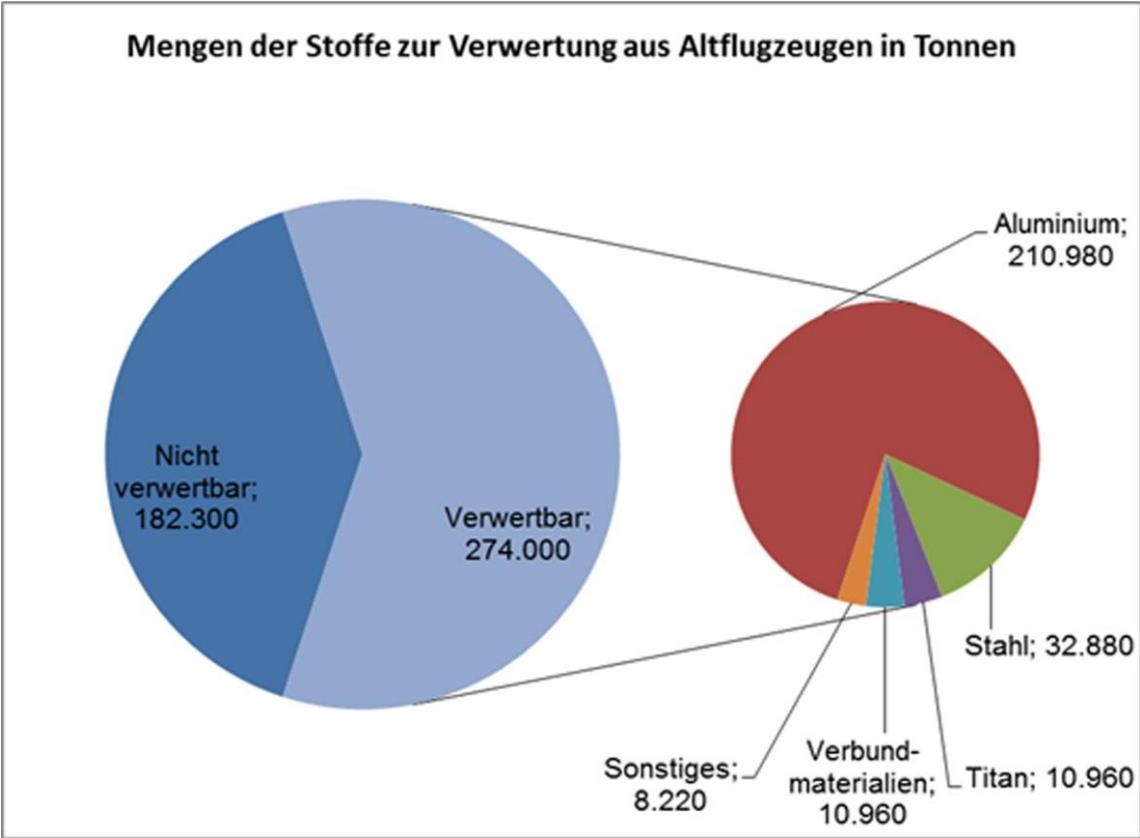


Abbildung 1: Erwartetes stoffliches Recyclingpotential aus Altflugzeugen weltweit (ohne die Flugmuster der „Schwarzen Liste“ der EU, private und militärische Flugzeuge)

In den nächsten 15 Jahren werden ca. 6.500 Altflugzeuge stillgelegt werden. Das bedeutet, dass in diesem avisierten Zeitraum etwa 430 Altflugzeuge pro Jahr außer Dienst gestellt werden. Bei einem mittleren Leergewicht von 70,2 Tonnen bedeutet das, dass ein theoretisches Materiallager von ca. 456.300 Tonnen Verbundmaterial der erfassten Altflugzeuge zur Verfügung steht. Davon können 60 Ma.-% in die stoffliche Verwertung gehen, womit etwa 274.000 Tonnen recycelbare Masse identifiziert werden können.

Bei einer mittleren Materialzusammensetzung von 77 Ma.-% Aluminium, 12Ma.-% Stahl, 4 Ma.-% Titan, 4 Ma.-% Verbundmaterial und 3 Ma.-% sonstige Materialien ergeben sich Rückgewinnungspotentiale wie in Abbildung 1 dargestellt. Die anderen 40 Ma.-% des Materiallagers eines Altflugzeugs setzen sich aus runderneuerbaren Komponenten (Refurbishable Components) und Stoffen zur Beseitigung zusammen (siehe hierzu auch Jeanvré [3]).

Das Potential der privaten und militärischen Altflugzeuge wurde in der dargestellten Betrachtung nicht mit einbezogen, da es in der Regel Maschinen unter 100 Passagiersitze sind. Es soll aber dennoch exemplarisch auf das große Potential der militärischen Maschinen in Amerika hingewiesen werden. In Tucson, Arizona auf der Davis-Monthan Airforce Base, 309th Aerospace Maintenance and Regeneration Group (309 AMARG) stehen über 4.000 militärische Flugzeuge und 6.000 Turbinen im geparkten und weitestgehend gewarteten Zustand. Der wesentlichste Vorteil für die Lagerung von Fluggeräten ist dort das aride Klima an diesem präferierten Standort. Durch die geringe Luftfeuchtigkeit wird der Korrosion und der Oxydation der Flugzeugzelle entgegengewirkt.



Abbildung 2: Geparkte Flugzeuge am Standort Tucson 309th Aerospace Maintenance and Regeneration Group (309 AMARG) [4]

Nach Aussage des Standortkommandanten 309th AMARG gehen ca. 20% der geparkten „Storage“ Flugzeuge wieder in den aktiven Dienst zurück. Abbildung 2 zeigt einen Teilausschnitt des sogenannten „Graveyard“ in Tucson, Arizona. Das Potential des Recyclingmaterials der Altflugzeuge liegt an diesem Standort bei 80%. Das wiederum bedeutet das zusätzlich ca. 3.200 Militärmaschinen in den nächsten Jahren außer Dienst gestellt werden, die in der Betrachtung in Abbildung 1 nicht aufgeführt sind [5].

Aufkonzentrierung von Altflugzeugen an ariden Standorten

Durch den montanistischen Bezug der Aufbereitung von Verbundstoffen, ist die Erfahrung der letzten Jahrtausende in die Aufbereitung und Aufkonzentrierung von Sekundärrohstoffen aus diversen Verbundmaterialien eingeflossen. Es wird nach der klassischen Vorzerkleinerung und dem benötigten Aufschluss des Materials konventionell über die Dichte, die Geometrie und die elektrischen Leitfähigkeit aufbereitet. Im Bereich der sensorgestützten Sortierung wird mittlerweile mit optischen Infrarotsystemen und Farberkennung gearbeitet. Die neuen Technologien wie das Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) System, die Röntgentransmission (XRT) und die Röntgenfluoreszenz (XRF) entwickeln sich stetig in der Erkennung weiter und in Kombination dieser Systeme werden schon gute Ergebnisse erzielt.

Die Frage ob ein Stoff recyclingfähig ist oder nicht hängt aber nicht zwingend mit dem „Stand der Technik“ der Aufbereitung ab. Eine wesentliche Grundüberlegung ist ein vordefinierter Massenstrom der auch genug Material enthält, damit sich diese Aufbereitung aus industrieller Sicht ökonomisch abbilden lässt. Bezogen auf das Altflugzeugrecycling wurde im vorherigen Kapitel dargelegt, dass ein weltweites Materiallager von ca. 456.000 Tonnen zur Verfügung steht. Das kann durchaus eine interessante Nische der Aufbereitung sein. Das Hemmnis dieser Grundüberlegung ist aber, dass die avisierten 430 Altflugzeuge die pro Jahr außer Dienst gestellten werden bisher auf der Welt mehr oder weniger vereinzelt verteilt sind. Dieses erfordert schon eher eine logistische Leistung, um an das Potenzial der Materialmenge zu gelangen.

Um das Recycling von Altflugzeugen ökologisch und ökonomisch vorantreiben zu können, müssten an bestimmten Standorten der Welt Altflugzeuge gesammelt werden, bis sich eine bestimmte „Masse“ für die Aufbereitungsmöglichkeiten angesammelt hat. Dies wäre in Deutschland zu vergleichen mit einem Schrottplatz nach VDI 4085 (Planung, Errichtung und Betrieb von Schrottplätzen - Anlagen und Einrichtungen zum Umschlagen, Lagern und Behandeln von Schrotten und anderen Materialien), nur für Altflugzeuge, die im weitesten Sinne ja auch Luftfahrzeuge sind.

Die „Hot-Spots“ oder „Graveyards“ sollten im Wesentlichen in ariden Gebieten angesiedelt werden. Dadurch kann auch eine Parkmöglichkeit für Flugzeuge angeboten werden, für den Fall, dass die Recycling-Entscheidung noch nicht getroffen ist und das Flugzeug wieder in den aktiven Dienst gehen soll. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Inkludierung eines zertifizierten Wartungsbetriebs (Part 145), der die Instandsetzung und den Ausbau der Komponenten übernimmt. Das Geschäftsmodell kann nur funktionieren, wenn die Dienstleistung des End-Of-Life-Service ganzheitlich angeboten wird. Des Weiteren könnte man an diesen Standorten nach der Aufbereitung der Materialien eine Schüttdichtenoptimierung für die Verbringung des Materials durchführen, um die ganzheitlichen Logistikkosten zu minimieren. Für den Rückbau und die Ersatzteilgewinnung ist Europa respektive Deutschland durchaus ein sehr interessanter Standort, da Deutschland im bedienten weltweiten Flugnetz zentral gelegen ist und der abschließende sehr kostenintensive Fairy-Flug eingespart werden könnte.

Leider gibt es in Europa kein arides Klima. Daher hat die Keske Entsorgung Gmbh eine Mobile Einheit für das Altflugzeugrecycling entwickelt. Diese Einheit ist in der Lage dezentral und autark überall auf der Welt eine umweltkonforme Schadstoffentfrachtung und eine Vorzerkleinerung der Flugzeugzelle durchzuführen. Durch diesen Ansatz kann weltweit auch für kleinere Flugmuster eine Rückbaudienstleistung angeboten werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Seit dem Beginn der Luftfahrtgeschichte wurden die verwendeten Materialien im Verbund in relativ kurzer Zeit immer komplexer. Ein Großraumflugzeug fliegt in einer Höhe von ca. 10.000 – 15.000 m über dem Erdboden (GND) und mit einer Geschwindigkeit von über 800 km/h. Daher sind die eingesetzten Verbundmaterialien in Flugzeugen gravierenden physikalischen Belastungen ausgesetzt. Aus diesem Grund stand bisher und wird auch weiterhin der Sicherheitsaspekt vor der recyclinggerechten optimierten Produktgestaltung stehen. Nichtsdestotrotz sollten mögliche Rezyklat-Substitute (z. B. Dämmmatten, Isoliermaterial usw.) für die Luftfahrt geprüft werden. Im Interieur Bereich sind durchaus interessante Ansatzpunkte für einsetzbare Substitute zu finden.

Der Produktzyklus eines Flugzeugs beträgt ca. 30 Jahre, das bedeutet dass jetzt die verbauten Werkstoffe von der letzten Generation zur Aufbereitung wieder in den Stoffkreislauf zurückgebracht werden müssen. Dies eröffnet eine mögliche Aufbereitung der verbauten Verbundstoffe, erschwert aber den Ansatz eines wünschenswerten „Close-Loop-Recycling“ in der Luftfahrt. Die Gefahr besteht, dass die Aluminiumlegierung aus der Luftfahrt in die Gusschmelzwerke (Refiner) gefahren wird. Dies ist ähnlich wie eine unendliche Verdünnung, daher z. Zeit eher ein „Downcycling“.

Das Thema Verbund „Altflugzeugrecycling“ ist bei einem Materiallager von 456.300 Tonnen in den nächsten 15 Jahren eine klassische Recyclingnische, die bei den derzeitigen Rohstoffkosten durchaus lukrativ erscheint. Ein Hemmnis ist die Ansammlung von mehreren Altflugzeugen an vereinzelt ariden Standorten. Dadurch könnte ein Stoffstrom generiert werden, der die Voraussetzung für ein ökonomisches und ökologisches Altflugzeugrecycling zugrunde legt.

Zum jetzigen Zeitpunkt muss sich die Aufbereitungstechnik von Altflugzeugen mit den Flugzeugen aus den 1980er Jahren auseinandersetzen. Die Flugzeuge aus der neuen Generation und dem Recycling aus dem Materialverbund mit einem großen Kohlefaseranteil kommen spätestens ab 2040 auf die Recyclingindustrie zu.

In Abbildung 3 ist ersichtlich, dass die „Neue Generation“ der Flugzeuge einen wesentlichen verbauten Anteil von Kohlefasern (Blau) mit 50% beinhaltet, wo bei der Aluminiumanteil (Rot) auf 20% gesunken ist.

Composite Structure Content of the 787

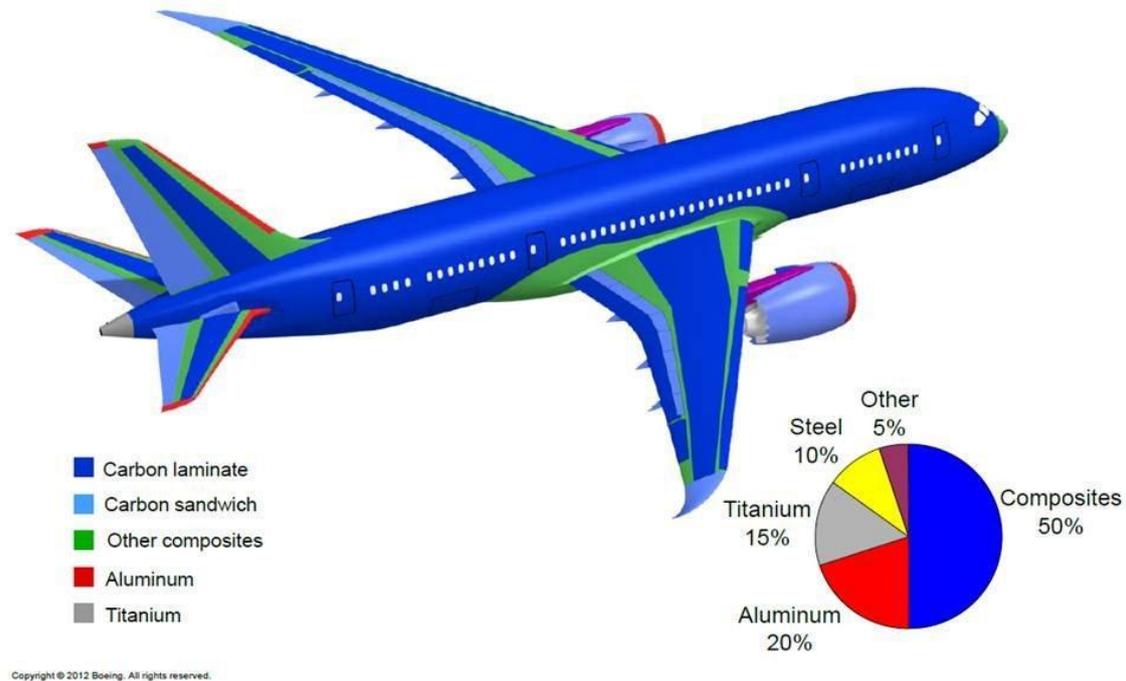


Abbildung 3: Boeing 787 Verbundbauweise [6]

Ein möglicher Ausblick für das Recyclingverfahren wäre die Möglichkeit der thermischen Behandlung der Kohlefasermatrix mit einer Niedertemperaturpyrolyse. Dadurch könnten die Kohlefaser freigelegt und die einzelnen Fasern aus dem Verbund gekämmt werden [7]. Damit würde ein größeres Einsatzfeld in der Industrie geschaffen, da die Fasern bei dem Prozess nur bedingt gekürzt werden.

Der derzeitige Lebenszyklus von Flugzeugen wird sich aus Gründen des hohen Kerosinverbrauchs und den immer strengeren Lärmschutzanforderungen zukünftig noch verkürzen. Vermutlich werden in den nächsten Jahren die Flugzeuge wesentlich eher außer Dienst gestellt, womit das Thema Materialrecycling eine noch größere Bedeutung erlangen wird.

Quellen

- [1] JEANVRÉ, Sebastian: Flugzeug-Recycling : Neue Ansätze zur Rohstoffrückgewinnung, Bd. 5. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl J.; GOLDMANN, Daniel (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin : TK (2), S. 457–468
- [2] SPEEDNEWS: *Aircraft In Storage by Airlines and Lessors*. URL <http://www.speednews.com/DataList.aspx?tagId=7&name=Aircraft+In+Storage+by+%20Airlines+and+Lessors>. – Aktualisierungsdatum: 2012-07-02 – Überprüfungsdatum 2013-01-10
- [3] JEANVRÉ, Sebastian und Duwe, Christian: Recycling komplexer Wertstoffe aus Altflugzeugen: Grundlagen und mögliche Handlungsoption, Bd. 6. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl J.; GOLDMANN, Daniel (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin : TK (2), S. 559-568
- [4] Bildrecht Dipl.- Ing. Sebastian Jeanvré, Tucson 2013, 309 AMARG
- [5] 309 AMARG Mitarbeiter mündl. Jeanvré, Sebastian (Adressat), 2013 Tucson
- [6] BOEING EDGE FLIGHT SERVICE: *787 Aircraft Rescue & Firefighting*. URL http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/faqs/787_composite_arff_data.pdf. – Aktualisierungsdatum: Juni 2012 – Überprüfungsdatum 2013-07-06
- [7] Prof. Daniel Goldmann, TU Clausthal. mündl. Jeanvré, Sebastian (Adressat), 2013 Clausthal-Zellerfeld