

Recycling komplexer Wertstoffe aus Altflugzeugen

– Grundlagen und mögliche Handlungsoptionen –

Sebastian Jeanvré und Christian Duwe

1.	Materialmix am Beispiel eines Airbus A300-B4/F	562
2.	Abschätzung des Recyclingpotentials für Altflugzeuge in den kommenden Jahren	564
3.	Zusammenfassung und Ausblick	566
4.	Literaturverzeichnis	568

Flugzeuge stellen mittlerweile eines der Hauptverkehrsmittel für Langstreckentransporte des Güter- und Personenverkehrs dar. Anders als in anderen Beförderungsbranchen, wie z.B. der Schifffahrt- oder Fahrzeugbranche ist die Historie der Herstellung von Flugzeugen in hoher Stückzahl allerdings eine noch vergleichbar junge Ingenieurskunst. Als 1889 Otto Lilienthal mit seinem Gleitflieger abhob und damit das Flugprinzip *schwerer als Luft* bewies, begründete er damit auch gleichzeitig den Beginn des starrflügeligen Personentransports. Es bedurfte weitere 14 Jahre, bis ein motorbetriebenes Fluggerät seinen Jungfernflug durch die Gebrüder Wright umsetzen konnte.

Flugzeuge sind ein immer weiter an Bedeutung gewinnender Bestandteil zukünftiger Recyclingunternehmungen. Sie beinhalten viele wertvolle Sekundärroh- und Wertstoffe (siehe hierzu auch Jeanvré [1]). Waren die Materialien im Flugzeugbau bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts noch aufleichte, nicht-metallische Werkstoffe wie Holz und textile Materialien beschränkt, gab es zwei entscheidende Entwicklungen, die die eingesetzten Materialien maßgeblich veränderten. Zum einen waren durch die Entwicklung der Aluminium-Elektrolyse (Bayer-Prozess seit 1889) große Mengen eines leichten aber doch robusten Materials verfügbar. 1915 mündete diese Entwicklung in der Vorstellung des ersten Ganzmetallflugzeuges J1 durch Hugo Junkers.

Der zweite entscheidende Schritt war die Entwicklung der sogenannten Verbundwerkstoffe, die seit den fünfziger Jahren weitere Fortschritte für die Herstellung von Flugzeugen ermöglicht haben. Das Gewicht wurde durch den Einsatz von Verbundwerkstoffen signifikant gesenkt und ermöglicht den Bau größerer, aber im Verhältnis leichter Flugmuster – im Airbus A380 wurden etwa 22 % Faserverbundwerkstoffe eingesetzt [2], was einer ungefähren Gewichtsersparnis von etwa 15 Tonnen zur konventionellen Bauart entspricht [3]. Auch beim Boeing 787-Dreamliner wurden fünfzig Prozent der metallischen Primärstrukturbauteile mit Faserverbundwerkstoffen substituiert [4].

Wie bei anderen Verkehrsmitteln ist auch bei Flugzeugen ein steigender Grad an Materialkomplexität zu verzeichnen. Anders als bei z.B. Schiffen (International Maritime Organisation (IMO)-Konvention *Inventory of Hazardous Materials (IHM)*) oder

Fahrzeugen (Altfahrzeugrichtlinie der EU, Altfahrzeugverordnung in Deutschland), ist der Recyclingprozess jedoch nur sehr unzureichend in den unterschiedlichen Lebenszyklusphasen verankert. Es ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren auch für außer Dienst gestellte Altflugzeuge ein Standard für den Rückbau und die Verwertung der Sekundärrohstoffe gesetzlich gefordert wird. Dies könnte in Anlehnung an die gültige europäische Altfahrzeugrichtlinie geschehen, da für Flugzeuge ähnliche Entsorgungsgrundlagen geltend gemacht werden könnten.

Für die Prüfung der Recyclingrouten der aus einem Flugzeugrückbau gewonnenen Aluminium-Stoffströme wurden im Vorfeld der Untersuchungen die relevanten Aluminium-Recycling-Prozesse identifiziert. Generell wird Aluminium-Schrott unter der Zolltarifnummer 76020090 (*Schrott aus Aluminium (ausg. Schlacken, Zunder usw. aus der Eisen- und Stahlherstellung, die wiedergewinnbares Aluminium in Form von Silicaten enthalten, Rohblöcke [Ingots] und ähnl. Rohformen, aus eingeschmolzenen Abfällen oder Schrott, aus Aluminium, Aschen und Rückstände der Aluminiumherstellung)*) gehandelt. Nach DIN EN 13920-1 bis 13920-16:2003-08 unterteilen sich Aluminium-Schrotte in 15 Schrottsorten, die hier nicht im Detail aufgeführt werden sollen.

Die sorgfältige und genaue Trennung der unterschiedlichen Aluminium-Werkstoffe ist wichtig, da Aluminium mit einem Standartpotential (E0) von -1,66 V zu den unedlen Metallen gezählt wird. Das Abtrennen der edleren Legierungsbestandteile wird so in der Regel unmöglich (Bild 1), da die Verunreinigungen in der Schmelze verbleiben und mit dem Metall neu vergossen werden.

Im Recyclingprozess müssen die Aluminiumschrotte daher schon im Vorfeld nach Legierungsbestandteilen und deren Zusammensetzung vorsortiert und anschließend getrennt weiter behandelt werden. Die dabei wichtigste Unterteilung ist die in niedriglegierte Knet- und in höherlegierte Gusslegierungen, woraus sich definierte Verarbeitungsrouten ergeben: Es wird zwischen den Refiner-Betrieben und den Remelter-Betrieben unterschieden. Refiner-Betriebe verarbeiten höher legierte Aluminium-Metalle und schmelzen diese zu Aluminium mit ähnlich hoher, allerdings definierter Legierungszusammensetzung um. Daraus werden Gusslegierungen und Desoxidationsaluminium erzeugt. Remelter-Betriebe auf der anderen Seite setzen niedrig bis nicht legiertes Sekundäraluminium ein und produzieren daraus Knetlegierungen. Als Einsatzmaterialmix wird ein, dem späteren Produkt entsprechender Materialmix eingesetzt [6].

Die in der Praxis möglichen Verfahren zur Trennung von Guss- und Knetlegierung sind der Hot-Crush-Prozess, das Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) Verfahren und eine kombinierte Röntgenanalyse. Im Hot-Crush-Prozess werden die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Guss- und Knetlegierungen genutzt, um eine selektive Trennung zu erreichen. Nach einer Erhitzung auf eine Temperatur kurz unter der Schmelztemperatur der Guss-Legierungen wird das Material mittels Hammer- oder Prallmühle zerkleinert. Durch die wärmeinduzierte Schwächung der Gussstruktur wird diese bevorzugt zerkleinert und kann durch Separationsverfahren bezüglich der Korngröße abgetrennt werden. Zu beachten ist, dass bei diesem Prozess auch die Ablösung von Oberflächenbeschichtungen bewirkt werden kann [7]. Als LIBS

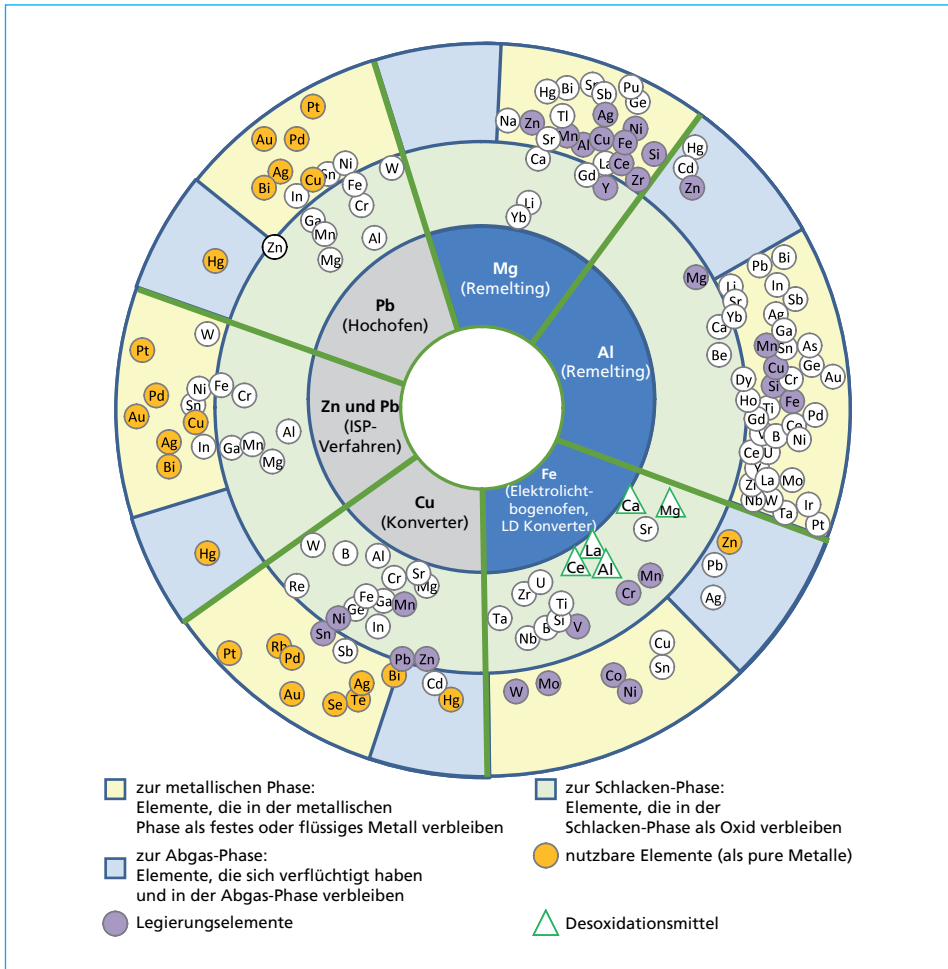


Bild 1: Darstellung einiger Hauptelemente und möglicher Legierungselemente sowie deren Verbleib nach Phase bei pyrometallurgischer Behandlung

Quelle: Hiraki, T.; Takeda, O.; Nakajima, K.; Matsubae, K.; Nakamura, S.; Nagasaka, T.: Thermodynamic criteria for the removal of impurities from end-of-life magnesium alloys by evaporation and flux treatment. In: Science and Technology of Advanced Materials 12 (2011), Nr. 3, S. 1–10, URL http://iopscience.iop.org/1468-6996/12/3/035003/pdf/1468-6996_12_3_035003.pdf

wird ein Verfahren bezeichnet, welches ein mittels gepulstem Laserstrahl erzeugtes Atomemissionspektrum als Sortiergrundlage verwendet. Zerkleinerte Materialpartikel können so in kurzer Zeit auf ihre Zusammensetzung analysiert werden und durch gekoppelte Luftdüsen in unterschiedliche Fraktionen aufgeteilt werden[8]. Ein neueres Verfahren kombiniert drei Separationsschritte in einem Verfahren: Nach einer Wirbelstromsortierung werden entweder eine doppelte Röntgentransmissions (XRT)-Sortierung oder eine Röntgentransmissions (XRT)-Sortierung und eine Röntgenfluoreszenz (XRF)-Sortierung durchgeführt. Ziel ist es, Aluminiumlegierungen einer bestimmten Sorte abzutrennen [8].

Die vorsortierten Stoffströme können im Anschluss eingeschmolzen werden. Ein gängiges Verfahren ist dabei das Schmelzen im Salzofen. Dabei werden je nach Oxidationsgrad des Aluminium-Inputs zwei Ofenformen unterschieden. Für niedrigoxidierte, feinteilige und verunreinigte Stoffe wird in der Regel ein Drehtrommelofen mit einem Salzfaktor (SF) von 0,8 – 1,2 eingesetzt. Hochoxidierte Vorstoffe werden in Kipptrommelöfen bei einem SF von 0,4 – 0,8 eingeschmolzen [6]. Das Salz dient dabei als Zunder-Inhibitor und Schlackenbildner.

Für die Qualität des Materials ist es also von entscheidender Bedeutung, die Input-Stoffströme nach der jeweiligen Zusammensetzung zu erfassen und zu behandeln, da Verunreinigungen nur durch aufwändige Verfahren wieder entfernt werden können, wie z.B. durch Chlorierung oder Vakuumdestillation [6].

Um Aussagen über mögliche Recyclingrouten der Aluminium-Bauteile aus dem Rückbau von Flugzeugen treffen zu können, muss der Materialmix eines Flugzeuges genauer spezifiziert werden. Dies konnte im Rahmen des Rückbaus eines Airbus A300 realisiert werden.

1. Materialmix am Beispiel eines Airbus A300-B4/F

Während des Rückbauprojektes eines A300-B4F im Oktober/November 2012 konnte die TU Clausthal Materialproben von definierten Stellen des Flugzeugs entnehmen. Auf diesem Weg wurde eine weitestgehend vollständige Stoffanalyse für die Außenhaut und eine Stoffanalyse wichtiger Strukturbauteile dieses Flugmusters erstellt.

Es wurden rund vierzig Proben aus signifikanten Positionen der äußeren Hülle und der tragenden Struktur des Flugzeugs entnommen und mittels optischer Emissionsspektroskopie chemisch auf ihre Zusammensetzung hin untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei diesem Flugmuster der Großteil der Außenhaut-Elemente wie Flugzeugrumpf, Flügel und Leitwerke aus Aluminiumlegierungen bestehen. Tragende Strukturen wie Stringer, Spanten, Beplankung usw. bestehen neben Aluminiumlegierungen auch aus Eisen-basierten Werkstoffen. Titanbasierte Werkstoffe konnten nur an einigen wenigen, hoch beanspruchten Stellen des Flugzeuges gefunden werden, z.B. am aerodynamischen Staupunkt über der Pilotenkanzel oder den Partien im Bewegungsbereich der Höhenleitwerke und an Teilen der Abgasanlage.

Als Hauptlegierungselemente der Aluminiumverbindungen wurden Kupfer, Magnesium und Zink identifiziert; Titan konnte als Legierungselement in besonders beanspruchten Bauteilen nachgewiesen werden. Es handelt sich folglich um Knetlegierungen der Legierungsgruppen 2xxx, 5xxx, 7xxx und im Fall der Aluminium-Titanlegierung um die Gruppe 8xxx. Unter den identifizierten Werkstoffen finden sich für den Bereich der Gusslegierungen die Legierungsgruppen 5xxxx (Al-Mg) sowie Al-Fe.

Weitere verbaute Werkstoffe sind Eisenlegierungen mit Chrom-, Mangan- und Nickel-Anteilen und auch Titanbauteile mit den Hauptlegierungselementen Molybdän, Aluminium und Vanadium.

Neben den Legierungen finden sich metallische Verbundwerkstoffe. Diese stellen hohe Anforderungen an die Aufbereitungsaggregate, um trotz der unterschiedlichen Fügetechniken möglichst hochwertigen Aufschluss zu erzielen.

Bild 2 zeigt ein Beispiel für die Vielfalt der Fügetechniken im Flugzeug. Neben der Nietung zweier vergleichbarer Aluminiumwerkstoffe (Al 1) ist deutlich ein dritter Aluminiumwerkstoff aus der Verstrebung erkennbar (Al 2). Zusammengehalten werden diese Materialien durch einen Stahlniet (Niete und Nietgewinde FeX). Zum Schutz gegen mechanische Beanspruchung wurde auf das Gefüge ein dünnes Titanblech aufgeklebt (Ti). Diese aufwändige Verbindung gilt es mit einem angepassten Aufbereitungsverfahren zu lösen, um die einzelnen Wertmetalle zurückzugewinnen.

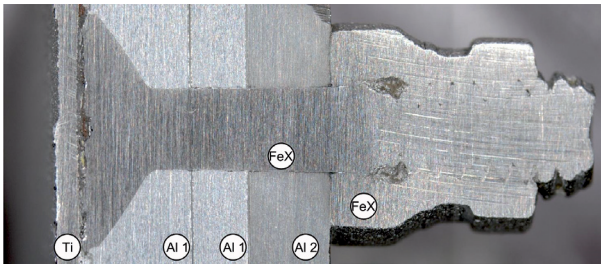


Bild 2:

Schnittbild zeigt einen mehrschichtigen Werkstoff-Verbund aus der Flugzeughaut: Erste und zweite Aluminiumhaut (Al 1), Verstrebungsmetall aus Aluminium (Al 2) und Stahl-Niet mit Nietgewinde (FeX) sowie Deckschicht aus Titan (Ti)

Darüber hinaus ist Aluminium aber auch in anderen Bauarten zu finden, wie in Bild 3 ersichtlich ist. Dabei wird Aluminium nicht nur als Teil einer Sandwich-Konstruktion für die Außenhaut eingesetzt, sondern auch als Material für die enthaltenen Honeycomb-Strukturen selbst verwendet.

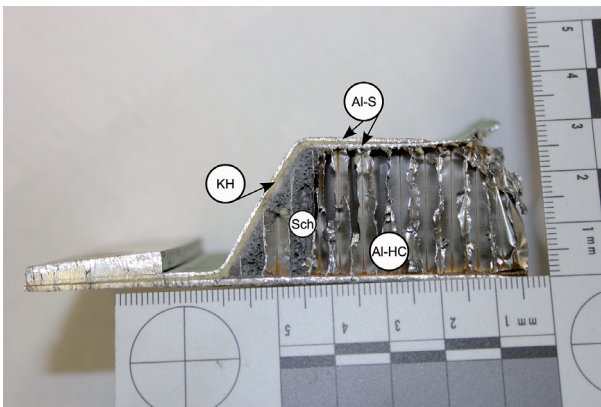


Bild 3:

Turbinenverkleidung mit Honeycombs aus Aluminium (Al-HC), einem stabilisierenden Schaumstoff (Sch), einer Kunststoff-/Harz-Zwischenschicht (KH) und Außenhaut-Lagen aus Aluminium (Al-S)

Ein weiteres großes Vorkommen von Aluminium im Flugzeug neben Elementen der Außenhaut und Verstrebungen sind signalleitende Kabel. Die geringere elektrische Leitfähigkeit des Aluminiums im Vergleich zu Kupfer wird in diesem Anwendungsfall wegen der deutlichen Gewichtseinsparung in Kauf genommen. Mehrfache Messungen

an den Schnittstellen von durchtrennten Kabeln aus dem Innenraumbereich der Maschine bestätigen, dass diese Kabel annähernd zu 99 % aus Aluminium bestehen. Siehe dazu auch Bild 4.

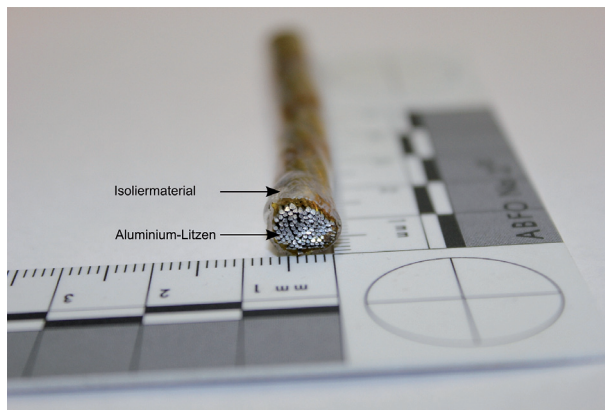


Bild 4:

Al-Kabelsegment aus dem Innenraum

Im Rahmen des Rückbauprojekts wurde festgestellt, dass für ein Flugmuster des Typs A300-B4F etwa 60 Ma.-% für Aufbereitung und Recycling genutzt werden können. Diese Zahl ergibt sich aus der verwertbaren Metallmenge von etwa 80 Ma.-% des Flugmusters, unter Berücksichtigung der Tatsache, dass bei dem entsprechenden Flugmuster bereits Bauteile wie Turbinen, Avionik, Flügelklappen und Wetterradar zur Wiederverwendung ausgebaut waren.

Eine Übertragung der gemachten Abschätzung zur Materialzusammensetzung auf andere Flugmuster der gleichen Größenordnung, ergibt für die weltweit verfügbaren Wertstoffe aus Altflugzeugen beachtenswerte Potentiale.

Anmerkung: Für die Materialanalyse wurden unterschiedliche Messverfahren eingesetzt. Zum einen wurden, wie oben erläutert, Proben genommen und chemisch analysiert, zum anderen wurde direkt vor Ort an denselben Positionen die Anwendbarkeit zweier Handheld-Geräte (Funkspektrometer und RFA) getestet. Diese hätten den Vorteil einer Direktanalyse der Materialien und deren Zuordnung zu passenden Stoffströmen. Durch die unterschiedlichen Analysemethoden und Eindringtiefen der Handheld-Geräte wurden allerdings Elementgehalte gemessen, die signifikante Abweichungen zu den Ergebnissen der chemischen Analysen darstellten. Der Einsatz dieser Geräte zur schnellen Analyse bestimmter Flugzeugteile ist also kritisch zu sehen.

2. Abschätzung des Recyclingpotentials für Altflugzeuge in den kommenden Jahren

Um im Hinblick auf eine Erfassung der Recyclingmetalle aus Altflugzeugen ein möglichst vollständiges Bild zu erhalten, muss neben den Zusammensetzungen der einzelnen Maschinen auch abgeschätzt werden, welcher recyclingrelevante Stoffstrom insgesamt zur Verfügung steht. Dafür wurde an der TU Clausthal eine quantitative

Erfassung nicht mehr flugtüchtiger Flugzeuge, nach Muster und Hersteller angefertigt. Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass etwa 24.000 aktive Flugzeuge (über 9 Tonnen Leergewicht) im kommerziellen Luftfahrtbetrieb weltweit in Betrieb sind [9]. Es ergibt sich daraus, dass etwa 6.000 Altflugzeuge (zwanzig Prozent der Flugflotte) inaktiv (*Storage*) sind. Diese Zahl setzt sich zusammen aus *luftfahrttüchtig geparkt*, *luftfahrtuntüchtig geparkt* und *außer Dienst genommenen Flugzeugen*. Vergleicht man dies mit den zu jeder Zeit in der Luft befindlichen Flugzeugen [10], ergibt sich ein interessantes Bild. Nach Aussage von Boeing [10] sind zu jeder erdenklichen Zeit weltweit mind. 6.000 Flugzeuge im Flugbetrieb. Dieses wiederum zeigt, dass für jedes geparkte Flugzeug ein aktives Flugmuster weltweit seinen Dienst tut. Die inaktiven Altflugzeuge sind an wenigen Standorten weltweit geparkt, die idealerweise trockene klimatische Bedingungen aufweisen um der Korrosion am Flugkörper entgegen zu wirken.

Es ist schwer abzuschätzen, wie viele Flugzeuge tatsächlich außer Dienst genommen sind, da in der Regel für die Zeit des *Storage* keine Abmeldung stattfindet. Stattdessen wird die Lufttüchtigkeit erhalten, um Reglementierungen zur Wiederzulassung und wirtschaftliche Nachteile der Abmeldungen zu umgehen.

Nach Auswertung der bereits veröffentlichten Quellen [11] mit aktuellen Zahlen [12] und den Ergebnissen der Forschung an der TU Clausthal wird davon ausgegangen, dass in den nächsten 15 Jahren insgesamt etwa 6.500 Altflugzeuge anfallen werden. Das bedeutet, dass im Mittel in dem genannten Zeitraum etwa 430 Altflugzeuge pro Jahr weltweit stillgelegt werden und dem Recycling zur Verfügung stehen.

Bezogen auf ein mittleres Leergewicht von etwa 70,2 Tonnen steht theoretisch ein Materiallager von etwa 456.300 Tonnen zur Verfügung. Davon können sechzig Prozent in die stoffliche Verwertung gehen, womit etwa 274.000 Tonnen recycelbare Masse identifiziert werden können. Bei einer mittleren Materialzusammensetzung von 77 Ma.-% Aluminium, 12 Ma.-% Stahl, 4 Ma.-% Titan, 4 Ma.-% Verbundmaterial und 3 Ma.-% sonstigen Materialien ergeben sich Rückgewinnungspotentiale wie in Bild 5 dargestellt. Die anderen vierzig Prozent des Materiallagers eines Altflugzeugs setzen sich aus runderneuerbaren Komponenten (Refurbishable Components) und Stoffen zur Beseitigung zusammen.

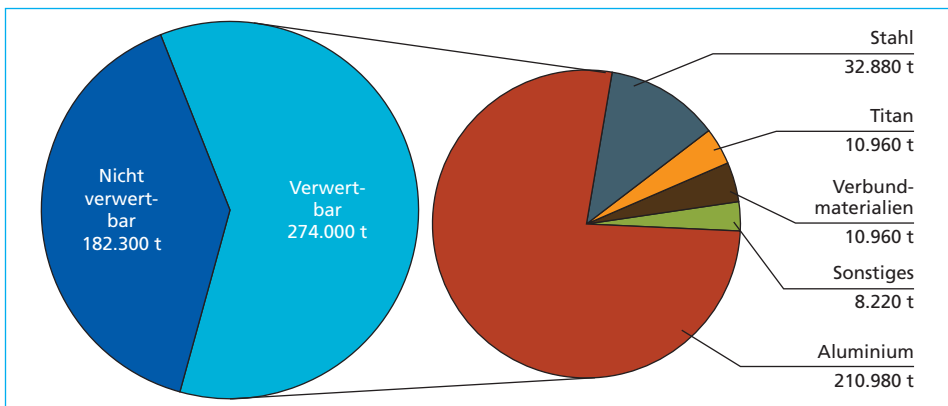


Bild 5: Erwartetes stoffliches Recyclingpotential aus Altflugzeugen weltweit (ohne die Flugmuster der Schwarzen Liste der EU, private und militärische Flugzeuge)

Weitere in Frage kommende Altflugzeuge, werden im extremen Low-Cost-Bereich von Airlines in Schwellenländern betrieben. In der sogenannten *Schwarzen Liste* der EU, die Betriebsuntersagung für sicherheitskritische Luftfahrtunternehmen für den europäischen Luftraum verhängt, sind etwa 300 Luftfahrtunternehmen aufgelistet, die in Europa nicht agieren dürfen (Stand 04.12.2012) [13]. In Bild 6 sind diese Länder kenntlich gemacht. Die aufgelisteten Luftfahrtunternehmen bieten daher auch ein zusätzliches Potential im Fokus des Materiallagers für stillzulegende Altflugzeuge.



Bild 6: Liste von Staaten mit Luftfahrtunternehmen, deren Luftfahrtbetrieb in der EU untersagt ist

Darüber hinaus kommen in den nächsten Jahren vermutlich weitere Altflugzeuge hinzu, die aus wirtschaftlichen Entscheidungskriterien wie z.B. hohe Betriebs- und Unterhaltskosten außer Betrieb gesetzt und durch die Neuentwicklung von optimierten Konzepten ersetzt werden. Gründe für die moderneren Flugzeuge sind ein weitaus geringerer Kraftstoffverbrauch durch die Gewichts- und Antrieboptimierungen und der geringere Fluglärm. Dadurch können mehr Flughäfen mit schärferen Anforderungen an den Lärmschutz angefliegen werden.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Seit dem ersten Vollmetallflugzeug im Jahre 1915, über den ersten Einsatz von Faserverbundstoffen im Jahr 1950 und bis zum Einsatz von fast fünfzig Prozent Faserverbundwerkstoffanteil durchläuft die Materialzusammensetzung im Flugzeugbau immer

komplexer werdende Entwicklungen. Dadurch wird der Aluminiumanteil in Flugzeugen zukünftig kontinuierlich durch leistungsfähigere Kompositwerkstoffe substituiert werden. Durch den Einsatz von Faser-Verbundwerkstoffen werden zukünftig aber deutlich höhere Anteile an wirtschaftsstrategischen Metallen verbaut werden, was am Beispiel Titan nachvollzogen werden kann. Bild 7 stellt dies anschaulich am Beispiel der Boeing-Flugmuster 747 aus dem Jahre 1969, der 757 aus dem Jahre 1982, der 777 aus dem Jahre 1993 und der 787 aus dem Jahre 2011 dar.

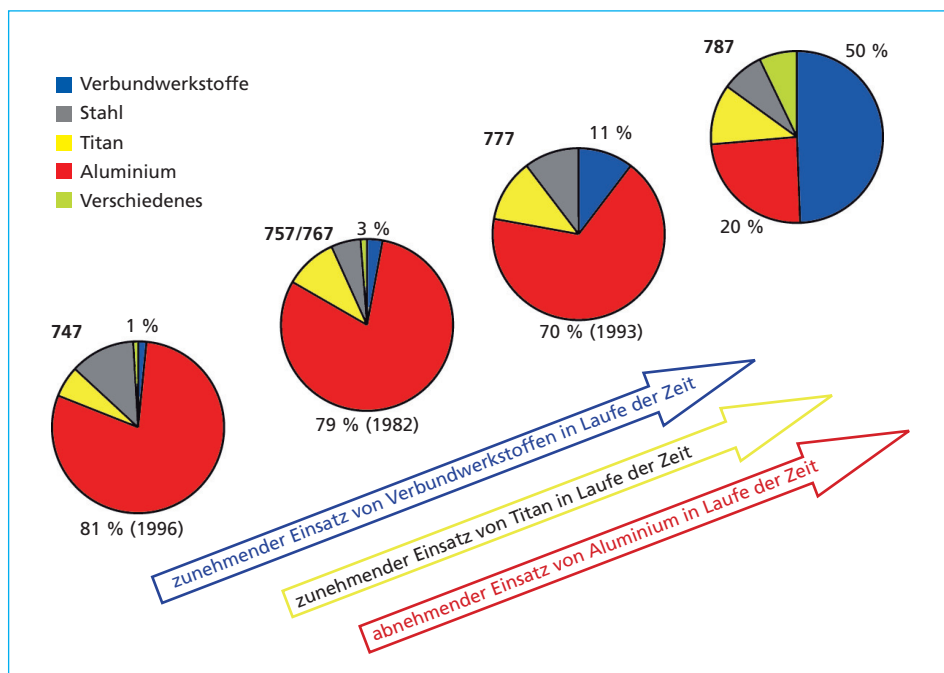


Bild 7: Kommerzielle Flugzeuge – Trend der Werkstoffanteile bei unterschiedlichen Flugmustern

Quelle: Boeing Edge Flight Service: 787 Aircraft Rescue & Firefighting. URL http://www.boeing.com/commercial/airports/misc/787_arff_data.pdf. – Aktualisierungsdatum: Juni 2012 – Überprüfungsdatum 2013-01-10

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass bis zum Jahre 2020 ein jährliches Aufkommen von etwa 430 Altflugzeugen zur Verwertung als realistisch angesehen werden kann. Aufgrund durchgeführter Untersuchungen zur stofflichen Zusammensetzung an einem Flugmuster und der Übertragung der entsprechenden Ergebnisse auf vergleichbare Flugmuster wurde ein Massenstrom von etwa 274.000 Tonnen über die nächsten fünfzehn Jahre an Material zur Verwertung ermittelt. Dieses Material setzt sich zusammen aus etwa 211.000 Tonnen Aluminiumlegierungsmaterialien, etwa 33.000 Tonnen Stahl und rund 30.000 Tonnen anderer verwertbarer Materialien.

Ein Großteil des Aluminiumrumpfes und der Flügelstruktur werden zukünftig durch Kohlefaserverbundwerkstoffe ersetzt. Auf diese neuen Materialzusammensetzungen müssen sich Verwertungs- und Recyclingbetriebe durch die Lebensdauer der entsprechenden Flugmuster im Zeitraum ab 2030/2040 einstellen.

4. Literaturverzeichnis

- [1] Jeanvré, S.: Flugzeug-Recycling : Neue Ansätze zur Rohstoffrückgewinnung. In: Thomé-Kozmiensky, Karl J.; Goldmann, Daniel (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 5. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 457-468
- [2] Pommeranz, G.; Lutter, U.: Composite Materials: Verbundwerkstoffe in der Luft- und Raumfahrttechnik. URL http://www.ib-pommeranz.de/download/composite_materials_-_verbundwerkstoffe_in_der_luft-_und_raumfahrttechnik.pdf. Aktualisierungsdatum: Juli 2008 – Überprüfungsdatum 2013-01-10
- [3] Airbus: A380 FAMILY: LOVE AT FIRST FLIGHT. URL <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/>. – Aktualisierungsdatum: Juni 2012 – Überprüfungsdatum 2013-01-10
- [4] Boeing: 787 Dreamliner. URL <http://www.boeing.de/Produkte-Dienstleistungen/Boeing-Commercial-Airplanes/787-Dreamliner>. – Aktualisierungsdatum: 2012 – Überprüfungsdatum 2013-01-10
- [5] Hiraki, T.; Takeda, O.; Nakajima, K.; Matsubae, K.; Nakamura, S.; Nagasaka, T.: Thermodynamic criteria for the removal of impurities from end-of-life magnesium alloys by evaporation and flux treatment. In: Science and Technology of Advanced Materials 12 (2011), Nr. 3, S. 1–10, URL http://iopscience.iop.org/1468-6996/12/3/035003/pdf/1468-6996_12_3_035003.pdf
- [6] Krone, K.: Aluminiumrecycling: Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung. Düsseldorf: Aluminium-Verl., 2000
- [7] Scamans, G.; Fan, Z.: Aluminium from Cans to Cars: Closing the ELV Recycling Loop. Aluminium in Automotive Conference 2011. Birmingham, United Kingdom, 2011. – Aluminium in Automotive Conference 2011
- [8] Owada, S.; Tsuchiya, K.; Takasugi, A.; Kato, Y.; Funakoshi, T.; Tanno, H.: Entscheidende Kombination: Aluminiumschrott. In: Recycling Magazin (2012), Nr. 12, S. 30-33
- [9] Annual Report of the Council 2011: Documentation for the session of the Assembly in 2013. 2012
- [10] Boeing Mitarbeiter. mündl. Jeanvré, Sebastian (Adressat)
- [11] Thomé-Kozmiensky, Karl J.; Goldmann, Daniel (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 5. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012
- [12] 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
- [13] Europäisches Parlament und Rat: Verordnung (EG) Nr. 2111/2005 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2005: über die Erstellung einer gemeinschaftlichen Liste der Luftfahrtunternehmen, gegen die in der Gemeinschaft eine Betriebsuntersagung ergangen ist, sowie über die Unterrichtung von Fluggästen über die Identität des ausführenden Luftfahrtunternehmens und zur Aufhebung des Artikels 9 der Richtlinie 2004/36/EG, Anhang A
- [14] Boeing Edge Flight Service: 787 Aircraft Rescue & Firefighting. URL http://www.boeing.com/commercial/airports/misc/787_arff_data.pdf. – Aktualisierungsdatum: Juni 2012 – Überprüfungsdatum 2013-01-10