

Steigflug oder Bruchlandung – Flugzeugrecycling aus abfallwirtschaftlicher Sicht –

Jörg Woidasky

1.	Abfallrecht und Luftfahrtrecht	179
2.	Entsorgungs-Schritte	179
3.	Parken und Langzeitlagerung.....	180
4.	Normung und Verordnungen für Altflugzeuge	181
5.	Wiederverwendung von Bauteilen aus Flugzeugen	182
6.	Zusammensetzung von Altflugzeugen.....	183
6.1.	Aluminium.....	183
6.2.	Carbonfaser-Composite.....	184
6.3.	Weitere Bestandteile von Flugzeugen.....	185
7.	Geschäftsmodelle zur Flugzeugentsorgung.....	186
8.	Zusammenfassung und Ausblick.....	186
9.	Quellen	187

Aircrafts are designed for the mission – and not for environment or disassembly!
(Bill Carberry, Boeing)

2013 war ein gutes Jahr für die Hersteller von Verkehrsflugzeugen: Boeing und Airbus lieferten insgesamt 1.274 Maschinen aus. Im gleichen Zeitraum gingen Bestellungen für insgesamt 3.150 Flugzeuge bei den beiden Herstellern ein [1]. Damit wird der Steigflug dieser Branche weiter fortgesetzt: Im September 1970 wurde der erste A300B2 bestellt und im Dezember 1970 Airbus Industries gegründet. Im Oktober 1972 war der A300-Erstflug. Insgesamt wurden von Airbus bis Dezember 2013 8.256 Flugzeuge ausgeliefert, von denen noch 7.622 betrieben werden. Noch 5.559 offene Bestellungen liegen bei Airbus vor [2], unter anderem werden derzeit monatlich 42 A320 ausgeliefert. Mit mittleren Nutzungszeiten zwischen 20 und 30 Jahren kann in absehbarer Zeit mit einem erheblichen Anstieg der Zahl von Verkehrsflugzeugen gerechnet werden, die zur Beseitigung anstehen.

Bild 1 zeigt auf der Basis einer angenommenen Nutzungsdauer von 30 Jahren die Abschätzung des Altflugzeugaufkommens weltweit. Den größten Anteil daran haben die Kurzstreckenmodelle B737 und A300/318/319/320, die Reichweiten um etwa 7.000 km und eine Kapazität von etwa 125 bis 185 Passagieren aufweisen. Es zeigt sich ein erhebliches Potenzial für die Rückgewinnung hochwertiger Werkstoffe, v. a. von Leichtmetall-Legierungen, aus diesen Anwendungen. Nimmt man eine Produktmasse nach der Trockenlegung von etwa 90 Tonnen an, so werden ausgehend von derzeit etwa 30.500 Tonnen im Jahr 2021 bereits etwa 72.600 Alt-Flugzeug-Materialien und Komponenten zur Verfügung stehen.

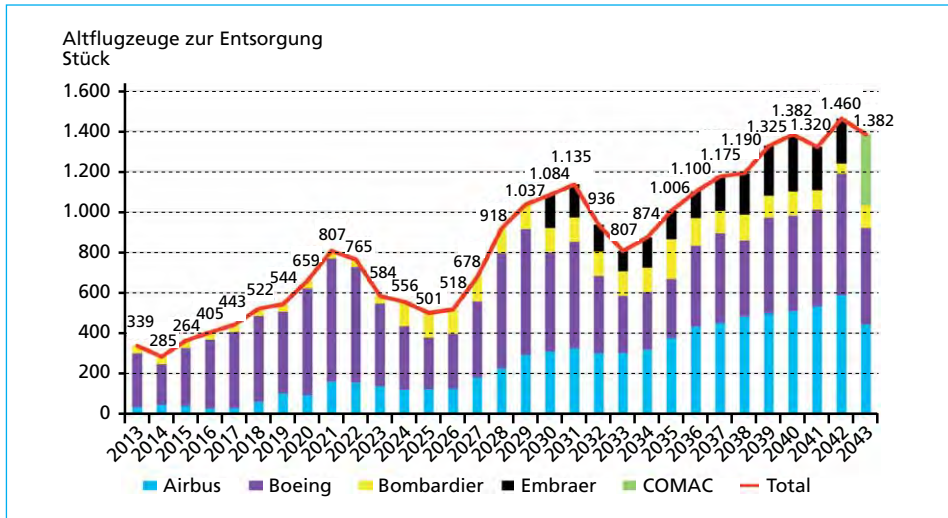


Bild 1: Abschätzung der Ausmusterungen von Verkehrsflugzeugen

Quelle: Baumann, T.: Flugzeug-Recycling. Bachelor-Arbeit. Hochschule Pforzheim, Dezember 2013

Ein Massenvergleich in einer Studie der französischen Forschungsorganisation ADEME am Beispiel Frankreich kommt jedoch zu einer anderen Einschätzung [4]: Für Frankreich wird mit einem Aufkommen von etwa 50 Altflugzeugen pro Jahr gerechnet, die mit einer geschätzten Masse von 100 Tonnen pro Flugzeug zu einem Potential von insgesamt 5.000 Tonnen pro Jahr zu entsorgenden Teilen und Werkstoffen führen. Im gleichen Zeitraum fallen jedoch unter anderem etwa eine Million Alt-Kraftfahrzeuge im gleichen Gebiet an, die mit einer Gesamtmasse von 1.250.000 Tonnen ein 250 mal höheres Massen-Potenzial für eine (stoffliche) Verwertung repräsentieren. Abschätzungen gehen davon aus, dass für Leichtbau-Werkstoffe im Flugzeugbau etwa hundertfach höhere Werkstoffkosten als im Kfz-Bereich zur Minimierung der Produktmasse zugelassen werden [5]. Rechtfertigen diese höheren Werkstoff-Kosten und damit potenzielle Recycling-Erlöse trotz der geringeren Anzahl der Altprodukte das Flugzeugrecycling? Ist eine Produktmasse von nur 0,4 Prozent der Alt-Kfz ausreichend, um den Aufbau einer Recyclingwirtschaft empfehlen zu können?

1. Abfallrecht und Luftfahrtrecht

Im Bereich der Altflugzeug-Entsorgung treffen mit dem Abfall- und dem Luftfahrtrecht zwei hoch regulierte Rechtsbereiche aufeinander. Gleichzeitig weisen die Branchen Luftfahrt und Entsorgung sehr unterschiedliche Strukturen, Geschäftsmodelle und -philosophien auf. Im rechtlichen Bereich sind in Europa insbesondere die Anforderungen an die Lufttüchtigkeit (*airworthiness*) der EG-Verordnung Nr. 2042/2003 über die *Aufrechterhaltung der Lufttüchtigkeit von Luftfahrzeugen und luftfahrttechnischen Erzeugnissen, Teilen und Ausrüstungen und die Erteilung von Genehmigungen für Organisationen und Personen, die diese Tätigkeiten ausführen* relevant. Dazu gehören insbesondere die Anhänge I (Part/Teil M: Continuing airworthiness/Aufrechterhaltung der Lufttüchtigkeit), II (Part/Teil 145: Maintenance Organisation Approvals/Zulassung von Instandhaltungsbetrieben), III (Part/Teil 66: Certifying Staff/Freigebeberechtigtes Personal) und IV (Part/Teil 147: Maintenance Training Organisation Approvals/Zulassung von Ausbildungsbetrieben für Instandhaltungspersonal). Sofern Teile aus Flugzeugen ausgebaut, gewartet und wieder eingesetzt werden, müssen – unabhängig davon, ob es sich um Wartungsarbeiten an Flugzeugen in Betrieb und Demontagearbeiten an Altflugzeugen handelt – diese Anforderungen an Organisation und Qualifikation eingehalten und dokumentiert werden. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist die Vermeidung der Entstehung von gefälschten Teilen (*bogus parts*), die fälschlicherweise bzw. in betrügerischer Absicht als lufttüchtige Teile (erneut) in Verkehr gebracht werden. Neben dem rein ökonomischen Schaden entstehen hierdurch nicht tolerierbare Sicherheitsrisiken.

2. Entsorgungs-Schritte

Aus technischer wie aus rechtlicher Sicht lassen sich insgesamt drei Phasen der Flugzeug-Entsorgung (*End of life management*) unterscheiden:

- Außerbetriebnahme und Trockenlegung (des rechtlich lufttüchtigen Flugzeugs)
- Teileausbau (aus dem rechtlich lufttüchtigen Flugzeug)
- Werkstoff-Rückgewinnung (aus dem nicht mehr lufttüchtigen Alt-Flugzeug)

sowie anschließend die Beseitigung der nicht verwertbaren Anteile des Altflugzeugs.

Tabelle 1 zeigt die mit diesen Arbeiten verbundene Massen- und Wertentwicklung im Flugzeug-Recycling. Die Entscheidung über die Lufttüchtigkeit des Flugzeuges, d.h. die Entscheidung zur Verschrottung ist unwiderruflich: Ein aus dem Regelungsbereich der EASA entlassenes Flugzeug kann nicht wieder lufttüchtig werden und muss daher abgewrackt werden. Tabelle 1 zeigt die Schritte der Flugzeug-Entsorgung im Überblick. Einen möglichen Ablauf für die Trockenlegung und endgültige Verwertung in Anlehnung an den Umgang mit Alt-Kfz beschreibt Jeanvré.[6]

Tabelle 1: Kosten- und Massenentwicklung bei der Entsorgung von Altflugzeugen

Status	Flugfähiges Altflugzeug	Teileausbau	Werkstoff-Rückgewinnung	Beseitigung
Masse	100 %	15 %	50 bis 60 %	20-30 %
Wert	100 %	90-95 %	10 %	-10 bis -15* %
Rechtsbereich	Luftfahrtrecht (EASA/FAA Part 145)	Luftfahrtrecht (EASA/FAA Part 145)	Abfallrecht	Abfallrecht
Aktivitäten	Decommissioning (Außerbetriebnahme): Reinigung Dekontaminierung	Parting out Teileausbau/ -rückgewinnung	Deconstruction (Demontage): Endgültige Trockenlegung Entfernung von Gefahrstoffen Sekundärrohstoff- gewinnung	*Zuzahlungs- erfordernis u.a.wegen flammge- Polymere Gefahrstoffe

Quelle: Carberry, W. (Fa. Boeing): AFRA (Aircraft Fleet Reäycling Association) and its members activities for end of life services. Vortrag auf dem First European Aircraft Recycling Symposium, Stuttgart, 13.12.2013, bearbeitet

3. Parken und Langzeitlagerung

Für das Parken wie auch für die Langzeitlagerung von Flugzeugen existieren Anforderungen im Luftfahrzeug-Wartungshandbuch (Aircraft maintenance manual) [7]. Abhängig von der Stand- bzw. Lagerzeit wird herstellerepezifisch (auch begrifflich) unterschieden in

- Abstellen für wenige Tage (parking)
- Verlängertes Abstellen für mehrere Wochen in flugfähigem Zustand (flight ready condition), wobei die Flugtüchtigkeit innerhalb weniger Tage wieder hergestellt wird, sowie die
- Lagerung (Storage/prolonged parking) für einen Zeitraum von bis zu mehreren Jahren. Hierfür werden umfangreiche Maßnahmen beginnend von der Abdeckung bzw. dem Abkleben von Öffnungen über das Abschmieren und das Aufbringen zusätzlichen Korrosionsschutzes bis hin zur Tankfüllung mit korrosionshemmend ausgerüstetem Flugbenzin erforderlich. Die Rückrüstung dieser Maßnahmen vor der Wiederinbetriebnahme benötigt etwa eine Kalenderwoche.

Bekannte Langzeit-Lagerplätze [8] liegen in Arizona (vier Standorte, davon ein militärisch genutzter), Kalifornien (2), New Mexico (1), Texas (1), North Carolina (1) Shawbury/UK (1), Alice Springs/Australien (1) sowie seit sehr kurzer Zeit in Teruel/ Spanien (1). Der letztgenannte Standort gehört organisatorisch zu Tarmac (Tarbes/ Frankreich), einem der acht europäischen Flugzeug-Demontagebetriebe. Ein häufiges Kennzeichen dieser Plätze ist deren Abgeschlossenheit, was mit Blick auf den logistischen Aufwand zur (stofflichen) Verwertung der Altflugzeuge nachteilig zu werten ist.

Die Lagerung von Flugzeugen zur Steuerung der Sitzplatz-Kapazitäten z.B. nach den Terroranschlägen vom 11. September ist bekannt. Daneben werden Flugzeuge so lange abgestellt, bis die Rohstoffpreis-Situation vorteilhaft für die Verschrottung ist. Oft sind jedoch auch Abschreibungsgründe ausschlaggebend für die Entscheidung, ein Flugzeug de facto endgültig abzustellen. Dies lässt sich am Beispiel einer McDonnell Douglas DC-10 (MD10) zeigen [9]:

Ein typischer Buchwert dieses von 1968 bis 1988 gebauten Typs liegt bei etwa 25 Millionen Euro. Sofern ein D-Check (Grundüberholung/Heavy maintenance visit) fällig ist, ist das Flugzeug aus rechtlichen Gründen nicht mehr flugfähig. Solche D-Checks erfolgen etwa alle fünf Jahre bzw. flugstundenabhängig, dauern mehrere Wochen und erfordern mehrere 10.000 Arbeitsstunden und einen entsprechenden finanziellen Aufwand. Das Erreichen eines solchen Checks ist daher oft der Entscheidungspunkt für die Lagerung oder Verschrottung des Flugzeugs. Werden zu diesem Zeitpunkt die Triebwerke demontiert und verkauft, so sind Erlöse von etwa vier Millionen US-Dollar realistisch. Für weitere in der Luftfahrt wiederverwendbare Teile können etwa eine halbe Million US-Dollar Erlöst werden. Die Werkstoffe erbringen nach der Demontage etwa eine Viertelmillion US-Dollar. Insgesamt steht dem Buchwert damit ein Marktwert von knapp fünf Millionen US-Dollar (25 Prozent des Buchwerts) gegenüber, so dass zur Vermeidung von Abschreibungen die Entscheidung gegen die Verschrottung fällt. Die Parkgebühren mit zwischen 250 bis 500 US-Dollar pro Monat im Langzeitlager (zum Vergleich dazu: Parkgebühren auf Verkehrsflughäfen von bis zu über 1.000 Dollar pro Tag) fallen in dieser Rechnung praktisch nicht ins Gewicht.

4. Normung und Verordnungen für Altflugzeuge

Zur Zeit existieren in Europa keine spezifischen rechtlichen Vorschriften für den Umgang mit Altflugzeugen. Während aus Forschungskreisen die Forderung geäußert wird, eine entsprechende Regelung sei erforderlich, halten sich die Akteure aus der Praxis, insbesondere die Hersteller von Flugzeugen, in dieser Diskussion zurück. Diskutiert wird z.B. die Erstellung einer Liste von Betrieben, die noch zu definierende Qualitätsstandards einhalten und daher für die Übernahme von Altflugzeugen bzw. von Arbeiten daran empfohlen werden können. Einzelne Akteure wie z.B. die Firma Keske aus Braunschweig entwickeln hier bereits eigene Standards bzw. aus den Anforderungen der EU-Altfahrzeug-Direktive abgeleitete Vorgehensweisen [11]. Sinnvoll und erforderlich erscheint zum derzeitigen Stand insbesondere eine Harmonisierung von Begrifflichkeiten zwischen den regionalen Definitionen z.B. des Abfallrechts und den (zumeist englischsprachigen) Regeln aus dem Luftfahrtbereich. Die bisherigen internationalen Qualitätssicherungs-Aktivitäten im Luftfahrtbereich z.B. der European Aerospace Quality Group (EAQG) oder deren Dachorganisation, der International Aerospace Quality Group (IAQG) haben sich bisher lediglich auf brancheninterne Qualitätssicherungsmaßnahmen und -prozesse fokussiert und den Entsorgungsbereich (noch) nicht erschlossen.

Grundanforderungen für die Organisation und die Durchführung von Demontage-Aktivitäten bei Altflugzeugen setzt bereits die Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA). Diese unabhängige, global tätige Organisation vertritt über siebzig Akteure aus dem Bereich der Flugzeugentsorgung, zu denen unter anderem auch Boeing gehört. Sie rechnet mit bis zu 12.000 Altflugzeugen in den kommenden zwanzig Jahren, die zur Entsorgung anstehen. Sie hat mit einem *Best Management Practice Guide* [12] (BMP Guide) bereits in der dritten Auflage einen Katalog erstellt, der regelmäßig fortgeschrieben wird und vor allem Management- und Organisationsanforderungen enthält. Insbesondere wird in diesen Anforderungen auf weitere Rechtsquellen z.B. zum Arbeits- und Gesundheitsschutz verwiesen, die am Ort der Arbeiten (*all applicable laws*) einschlägig sind. Insofern erscheint der Katalog zwar geeignet, eine lokale *Compliance*, d.h. regelgerechte Flugzeugentsorgung sicherzustellen, ob so jedoch ein global einheitliches und gleichzeitig hochwertiges Niveau der Arbeiten sichergestellt werden kann, muss noch gezeigt werden. Zumindest für Europa erscheint dies ohne zusätzliche Standards möglich. Eine Akkreditierung nach AFRA-BMP Guide ist für die beiden Teilbereiche *Demontage* (Disassembly) und *Verwertung* (Recycling) möglich. Davon haben insgesamt 26 Unternehmen bereits Gebrauch gemacht (für beide Bereiche drei Unternehmen, für den Bereich Demontage insgesamt 17 und für die Verwertung sechs Unternehmen). Die BMP-Guide-Anforderungen sollen zukünftig weiter verschärft werden.

5. Wiederverwendung von Bauteilen aus Flugzeugen

Zu den sehr hochwertigen Bauteilen aus Flugzeugen gehören vor allem die Triebwerke sowie die APU (auxiliary power unit) und das Fahrwerk. Bei einem Wiedereinsatz können diese Teile mehrere Millionen Euro Erlösen. Im Vergleich zu Neuteilen der Hersteller sind Preisabschläge von -40 Prozent bei Gebrauchtteilen vom Hersteller sowie von -50 Prozent beim Einkauf von sonstigen Händlern (surplus parts dealers) die Regel. Auch die Wiederverwendung von Klappen, Türen oder anderer Teile ist gängige Praxis und erfolgt unter den Anforderungen der EASA/FAA Part 145. In Verbindung mit Verwertungsprozessen wird hier nach Angaben der Anlagenbetreiber *ohne Zuschüsse und rechtliche Vorschriften* [13] eine Gesamt-Wiederverwendungs- und Verwertungsquote von über neunzig Prozent erreicht (Tabelle 2). Während die Teile einen Millionenwert darstellen, liegen die Erlöse aus der werkstofflichen Verwertung des (Rest-)Flugzeuges zwischen etwa 80.000 und 250.000 Euro.

	Stoffliche Verwertung (Reuse and recovery) Prozent	Abfallanteil Prozent
Heutige Praxis	30 - 40	40 - 50
Pamela Life (2007 - 2009)	75	15
Tarmac	> 90	< 10

Tabelle 2:
Wiederverwertungs-, Verwertungs- und Beseitigungsanteile von Altflugzeugen

Quelle: Mallavalon, O. (Fa. Airbus): Aircraft end of life-management - the Airbus experience feedback. Vortrag auf dem First European Aircraft Recycling Symposium. Stuttgart, 12.-13.12.2013. Stuttgart, 13.12.2013

6. Zusammensetzung von Altflugzeugen

Der wichtigste Flugzeug-Werkstoff ist Aluminium. Die wichtigste Flugzeug-Legierung ist 7075, daneben sind vor allem die Legierungen 6061, 6063, 2024 und 5052 relevant [15]. Diese Aluminium-Legierungen werden seit Jahrzehnten erfolgreich in der Luftfahrt als Strukturbauteile, Außenhaut, für Rumpf, Flügel, Leitwerke, aber auch z.B. auch in der elektrischen Verkabelung eingesetzt. Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Materialien eines Airbus A300. Neben den Aluminium-Legierungen der 2000-, 5000 (Al-Mg), 7000- und auch der 8000-Serie (Al-Ti) werden Titan (z.B. am Staupunkt über der Pilotenkanzel, der Abgasanlage und im Bewegungsbereich des Höhenleitwerks), Eisenmetalle (z.B. als Niete,) sowie Elastomere (vorrangig als Dichtmaterial) und Dämmstoffe eingesetzt [16]. Die Innenausstattung (*Cabin interior*), die in kleineren Flugzeugen wie z.B. bei der B737 eine Masse von etwa 5 Tonnen und in größeren Mustern wie der B747 etwa 10 Tonnen ausmacht, wird als derzeit als kaum verwertbar angesehen, jedoch während der Nutzungsphase regelmäßig etwa alle fünf bis zehn Jahre erneuert.

Seltene bzw. Edelmetalle werden im Bereich der Triebwerke (z.B. Platin-Beschichtungen von Triebwerks-Schaufeln; Gold als Legierungselement z.B. mit Nickel für Beschichtungen und Lote, in Wärmetauschern und Kraftstoffleitungen) eingesetzt. Daneben gewinnen Verbundwerkstoffe an Bedeutung: Ein typischer A300 von 1980 weist,

nachdem Avionik, Turbinen, Klappen demontiert wurden, etwa vier Prozent Verbundwerkstoffe auf, ein A310-200 besteht bereits aus zwölf Prozent Verbundwerkstoffen, der A400M zu 30 Prozent und der A350-900XWB zu 55 Prozent (mit Glas-, Aramid- und Carbonfasern). Beim A380 liegt der Verbundwerkstoff-Anteil bei 25 Prozent, wobei etwa 85 Prozent der Compositmaterialien CFK sind [17]. Typische Verbrauchsmengen von Carbonfasern liegen bei etwa 20 Tonnen pro Flugzeug bei deno.g. Typen. Bei Produktionsmengen von bis zu zehn Flugzeugen monatlich ergeben sich so Verbrauchsmengen von etwa 5.000 Tonnen/a für Großflugzeuge [18].

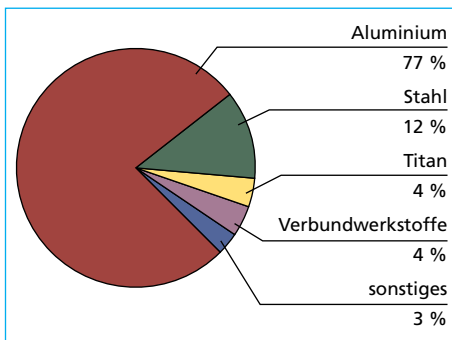


Bild 2: Typische Werkstoffe in einem Flugzeug am Beispiel Airbus A300

Quelle: Airbus (Hrsg.): Pamela Training Kit – Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft. Blagnac/F, 2008

6.1. Aluminium

Für die hochwertige Verwertung von Aluminiumlegierung aus Altflugzeugen sind Identifikation und Getrennthaltung von erheblicher Bedeutung. Tabelle 1 zeigt Legierungs-Zusammensetzungen im Vergleich mit einer Abschätzung einer Mischqualität unter der Annahme, dass Legierungen getrennt nach 2000- und 7000-Serien gehalten werden. Diese Getrennthaltung nach diesen Serien ermöglicht den Wiedereinsatz von Recycling-Aluminium im Flugzeug, allerdings nur in Bereichen außerhalb der Primär- und Sekundärstrukturen wie z.B. in Versteifungselementen oder Klappen [20].

Legierung Gew.-%	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
2014	~ 93	4,4	< 0,7	0,5	0,8	0,8	< 0,15
2214	~ 93	4,4	< 0,3	0,5	0,8	0,8	< 0,15
2024	~ 93	4,4	< 0,5	1,5	0,6	< 0,5	< 0,25
2324	~ 94	4,1	<0,12	1,5	0,6	< 0,1	< 0,15
7050	~ 89	2,3	< 0,15	2,2	< 0,1	< 0,12	6,2
7075	~ 90	1,6	< 0,5	2,5	< 0,3	< 0,4	5,6
7475	~ 90	1,6	< 0,12	2,2	< 0,06	< 0,1	5,7
7178	~ 89	2,0	< 0,5	2,8	< 0,3	< 0,4	6,8
Legierungen aus der Demontage							
2000-Serie getrennt gehalten	~ 93	4,4	0,5	1,0	0,7	0,5	0,1
7000-Serie getrennt gehalten	~ 90	2,0	0,4	2,5	0,2	0,2	6,0
2000/7000 Serie ge mischt er- fasst	~ 92	3,0	0,4	1,8	0,4	0,4	3,0

Tabelle 3:

Zusammensetzung von Aluminium-Legierungen

Quelle: Das, S.: Recycling Aluminium Aerospace Alloys. In: Advanced Materials and Processes. March 2008, S. 34 - 35

Für die Identifikation von Aluminiumlegierungen stehen vor allem spektroskopische Verfahren wie die Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) bereits als Handgerät zur Verfügung. Für die Messung von Aluminium-Legierungen aus Flugzeugen ist eine Probenvorbehandlung (Entschichtung) erforderlich, um den Messkopf direkt auf dem Metall aufsetzen zu können. Das mobile Messverfahren an sich arbeitet zerstörungsfrei und erbringt halbquantitative Ergebnisse, die jedoch zur Materialidentifikation ausreichen. Ein alternatives, jedoch stationäres Verfahren, ist die Laser-Direktanalyse. Hier wird ein Teil der Probe durch einen Laserstrahl verdampft und im bis zu 10.000 K heißen Plasma elementspezifische Emissionen gemessen. Dabei entstehen Oberflächenschädigungen in der Größenordnung von Kratern bis ca. 300 µm Durchmesser. Das Verfahren wird bereits stationär zur Trennung von Aluminiumlegierungen nach Guss- (Si-Gehalt größer als sechs Gew.-%) und Knetlegierungen (Si-Gehalt kleiner als 3,5 Gew.-Prozent) für bis zu 40 Teile pro Sekunde bzw. bis zu 1,8 Tonnen pro Stunde eingesetzt. Die Weiterentwicklung wird zur Identifikation einzelner Legierungen und Steigerung des Durchsatzes betrieben [22]. Mit Blick auf die Demontageerfordernisse wird u.a. die Entfernbarkeit der Niete (Eisenwerkstoffe) von den Aluminium-Strukturen diskutiert.

6.2. Carbonfaser-Composite

Carbonfasern gewinnen im Luftfahrtbereich zur Zeit auch für Strukturbauteile erheblich an Bedeutung. Der Gesamtbedarf an C-Fasern wird derzeit weltweit mit etwa 50.000 Tonnen abgeschätzt [23]. Recycling dieser Fasern ist mit Blick auf die hohen Faserpreise von über 11.000 Euro pro Tonne attraktiv. Es wird zudem angenommen,

dass etwa 20 Prozent der eingesetzten Fasermasse als Produktionsabfälle anfallen [24]. Die Qualität dieser Abfälle reicht von Faserspulen über Prepregs in verschiedenen Aushärtungsstadien bis hin zu Bauteilen. Altteile aus dem Luftfahrtbereich in größeren Mengen können etwa ab 2030 erwartet werden.

Neben der Zerkleinerung von C-Fasern bzw. -Compositen, die hohe Anforderungen an die Aufbereitungstechnik stellt, ist die Entfernung der Harzmatrix der entscheidende Schritt, um einen Wiedereinsatz der Fasern zu ermöglichen. Prinzipiell kommen dafür der Einsatz von Lösemitteln, überkritischen Fluiden oder die Pyrolyse in Frage. Letzteres hat sich im technischen Bereich durchgesetzt. Mehrere Anlagen weltweit, die jeweils um etwa 1.000 Tonnen pro Jahr Rezyklatfasern bereitstellen können, setzen diesen Prozess ein. Die Anlage der Recycled Carbon Fiber Ltd. (West Midlands/UK) arbeitet mit einem kontinuierlichen Prozess im Durchlaufofen. Weitere Anlagen werden in Japan (Mitsui Mining Co./Omuta City), in USA (Adherent Technologies/Albuquerque mit einem Vakuumpyrolyse-Verfahren; Materials Innovation Technologies/Lake City/SC) und Deutschland (Hadeg GmbH/Stade und CFK Valley Recycling Stade GmbH) betrieben bzw. aufgebaut. Ein Unternehmen (Firebird Advanced material/Raleigh/NC/USA) setzt zur Pyrolyse ein kontinuierliches Mikrowellenverfahren ein [25]. Es wird geschätzt, dass Recycling-Fasern etwa 50 bis 70 Prozent der Neufaser kosten und im Vergleich zur Neufaser nur fünf Prozent des Energieverbrauchs hervorrufen [26].

Für den hochwertigen Wiedereinsatz der Fasern sind Fragen der Ausrichtung und der Handhabbarkeit der Rezyklat-Fasern zu lösen. Ein Entwicklungsschwerpunkt derzeit stellt die Umwandlung der Rezyklat-Fasern in Garne dar, die derzeit z.B. in UK untersucht und im Pilotmaßstab bereits von einem Firmenkonsortium unter Führung der Advanced Composite Group ACG umgesetzt wird. Die Untersuchungen zeigten, dass ein Verbundwerkstoff aus Carbonfaser-Rezyklat und PET 50 Prozent der Zugfestigkeit und 90 bis 100 Prozent des Zugmoduls von vergleichbarer Neuware erreichte [27]. Recyclingverfahren z.B. aus dem Automobil-Bereich nutzen Rezyklate aus Produktionsabfällen zur Herstellung mattenförmiger Halbzeuge, die anschließend mit Matrixmaterial infiltriert und ausgehärtet werden.

Eine der wichtigsten Herausforderungen für die Verwertung dieser Verbundwerkstoffe besteht derzeit in der Marktentwicklung für die Rezyklatfasern und der damit verbundenen technischen Anforderung, größtmögliche Faser-Festigkeiten für das Rezyklat-Fasern enthaltende Bauteil nutzen zu können. Nur so lassen sich lastpfadgerechte Verstärkungen mit geringster Bauteil-Masse realisieren.

6.3. Weitere Bestandteile von Flugzeugen

Derzeit ist die Identifikation und Erfassung von Teilen und Werkstoffen in Altflugzeugen ein Forschungs- und Entwicklungsgebiet. Trotz guter Dokumentation während der Herstellung sowie der Nutzungsphase ist es erforderlich, im Altflugzeug insbesondere den Ort und die Menge dort vorhandener Gefahr- und Werkstoffe zu kennen. Dazu zählen die Flüssigkeiten (Flugbenzin, Hydrauliköle, Frostschutz, Wasser, Abwasser; CKW in Klimaanlage), Gase bzw. Druckbehälter (Halon aus Löscheinrichtungen;

Aufblaseinrichtungen für Notrutschen), aber auch Feststoffe (Faserdämmungen aus Glas oder Bremsbeläge mit Asbest) oder Beschichtungen (Chrom-VI-Beschichtungen, Strontium-haltige Primer, Cd als Korrosionsschutz für Befestigungen, elektrische Verbindungen als Korrosionsschutz und Opfer-Verschleißschutz, zur Sicherstellung der galvanischen Verträglichkeit mit Al und Fe). Daneben existieren dem Atomrecht unterliegende Substanzen wie z.B. Alpha-Strahler in Rauchdetektoren in der Kabine oder Ballastgewichte, die alle spezifische Verwertung- bzw. Entsorgungswege erfordern und somit zu einem erheblichen (Kosten-)Aufwand bei der Flugzeugverwertung beitragen.

7. Geschäftsmodelle zur Flugzeugentsorgung

In Europa arbeiten derzeit acht Unternehmen an der Demontage von Altflugzeugen [28]. Einer dieser Akteure ist das Unternehmen Tarmac, an dem Airbus sowie Sita, Snecma und EquipAero beteiligt sind. Ausgehend vom EU-LIFE-Forschungsvorhaben *Pamela* wurden am Standort Tarbes in Südfrankreich Aktivitäten in industriellem Maßstab entwickelt, die nach Unternehmensangaben als *Center of Reference* für die gesamte Branche dienen sollen. 2012 begann die Entwicklung eines weltweiten Netzwerks mit Zentren in Europa, dem mittleren Osten, Südasien und Amerika. 2012 wurde in Teruel (Nordspanien) ein Abstellplatz in Betrieb genommen, der die Tarmac-Stellkapazität verzehnfacht. Am Standort in Tarbes sind 25 Flugzeuge abstellbar, 50 Mitarbeiter erwirtschaften dort einen Jahresumsatz von zehn Millionen Euro Umsatz mit Wartungs-, Demontage- und Verwertungsaktivitäten von Altflugzeugen aller Hersteller entsprechend EASA/FAA Teil 145. Die Erkenntnisse daraus fließen in die Entwicklungsaktivitäten bei Airbus zurück, sowohl für die derzeit in Betrieb befindliche Flotte als auch für Neuentwicklungen [29].

Andere Unternehmen, z.B. Firma Keske aus Braunschweig, verfolgen einen anderen, mehr netzwerkorientierten Ansatz: Mit Hilfe mobiler Demontagetechnik werden weltweit akquirierte Altflugzeuge vorrangig aufgesucht und vor Ort demontiert, sofern ein Überführungsflug aus technischen oder rechtlichen Gründen zum Betriebsgelände nicht möglich ist. Einen wichtigen Anteil an der Wertschöpfung haben hier die Bauteile, die oft dem Letztbesitzer übergeben werden und nicht ins Eigentum des Demontageunternehmens übergehen. Je nach Aufgabenstellung werden solche Demontage- und Verwertungsleistungen gemeinsam mit weiteren Unternehmen angeboten. Diese Herangehensweise ist eher typisch für die Mitgliedsbetriebe der AFRA.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Flugzeugentsorgung entwickelt sich derzeit zu einem zunehmend diskutierten Thema – nicht zuletzt aufgrund der rapide steigenden Zahlen von Altflugzeugen. Im Vergleich zu Kfz handelt es sich um vergleichsweise geringe Stückzahlen von Altprodukten, die darüber hinaus an wenigen Orten und von relativ wenigen Letztbesitzern weltweit anfallen. Die Erwartung von Akteuren aus der Abfallwirtschaft, mit der Verwertung

von Flugzeugen ein hochprofitables Geschäftsfeld erschließen zu können, wird sich jedoch nicht einfach erfüllen lassen: Der Hauptgrund hierfür ist die hohe Relevanz der Wertschöpfung aus Gebrauchtteilen für den gesamten Entsorgungsprozess, die jedoch nur unter Berücksichtigung der Luftfahrt-Anforderungen (EASA Part 145) vollständig erschlossen werden kann. Im Vergleich zu Kfz sind die Produkte komplexer und weisen darüber hinaus mehr gefährliche Anteile auf. Relevante Schwerpunkte der Diskussion sind derzeit vor allem Fragen nach den rechtlichen Rahmenbedingungen, der Logistik und den Märkten:

- Wird aus Gründen der Umweltvorsorge eine spezifische rechtliche Regelung für den Umgang mit Altflugzeugen in Deutschland oder Europa notwendig? Die derzeit verfügbaren Informationen lassen keine eindeutige und belastbare Bewertung der Umwelt- und Verwertungsleistung der Akteure zu.
- Wie lassen sich die logistischen Fragen hinsichtlich der Erreichbarkeit von Altflugzeugen und der Absteuerung der gewonnenen Werkstoffe aus Sicht der Demontage- Unternehmen lösen? Es steht zu erwarten, dass nur ein geringer Anteil der Altflugzeuge tatsächlich im Gebiet der Europäischen Union zur Entsorgung kommt, so dass Geschäftsmodelle europäischer Demonteure und Verwerter darauf eingestellt werden müssen.
- Wie können die zurückgewonnenen Werkstoffe sinnvoll und wirtschaftlich in Wertschöpfungsketten eingebracht werden? Technische Möglichkeiten für die Verwertung von Aluminium und auch für Compositmaterialien bestehen prinzipiell, jedoch sind vor allem bei Rezyklatfasern die Märkte und technischen Anwendungsmöglichkeiten kaum entwickelt.

Die Luftfahrt- und die Entsorgungswirtschaft sind strukturell und mit Blick auf ihre Geschäftsphilosophien äußerst unterschiedlich. Auch die Rechtsrahmen, in denen die Akteure sich jeweils bewegen, sind komplex und hochspezifisch, was eine Zusammenarbeit an dieser Schnittstelle herausfordernd macht. Mit dem (stationären) Tarmac- und dem (netzwerkorientierten) AFRA-Modell existieren für die Flugzeugentsorgung zwei grundsätzlich unterschiedliche Herangehensweisen. Sicher ist in diesem Bereich lediglich, dass zukünftig jährlich mehrere hundert Altflugzeuge zur Entsorgung anfallen werden – wo was mit diesen geschieht, ist derzeit jedoch weitgehend unbestimmt.

9. Quellen

- [1] Flottau, J.: Rekordflieger. Süddeutsche Zeitung, Nr. 10, 14.01.2014, Seite 22
- [2] http://www.airbus.com/no_cache/company/history/the-timeline/; 14.1.2014
- [3] Baumann, T.: Flugzeug-Recycling. Bachelor-Arbeit. Hochschule Pforzheim, Dezember 2013
- [4] Mallavalon, O. (Fa. Airbus): Vortrag auf dem First European Aircraft Recycling Symposium. Stuttgart, 12.-13.12.2013.
- [5] Kopp, G.; Burkhardt, N.; Majic, N.: Leichtbaustrategien und Bauweisen. In: Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau. München, 2011, S. 68
- [6] Jeanvré, S.; Duwe, C.: Technologies and practical experiences on AC end of life operations from a dismantler's point of view. In: Woidasky, J. (Hrsg.): The first European Aircraft Recycling Symposium. Stuttgart, 12.-13.12.2013, S. 29

- [7] <http://www.lufthansa-technik.com/maintenance-decommissioned-aircraft/>; 14.1.2014
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_boneyard; 12.1.2014
- [9] Carberry, W. (Fa. Boeing): AFRA (Aircraft Fleet Reâcycling Association) and its members activities for end of life services. Vortrag auf dem First European Aircraft Recycling Symposium, Stuttgart, 13.12.2013
- [10] Baumann, T.: Flugzeug-Recycling. Bachelor-Arbeit. Hochschule Pforzheim, Dezember 2013
- [11] Jeanvré, S.; Duwe, C.: Technologies and practical experiences on AC end of life operations from a dismantler's point of view. In: Woidasky, J. (Hrsg.): The first European Aircraft Recycling Symposium. Stuttgart, 12.-13.12.2013, S. 29
- [12] Aircraft Fleet Recycling Association (Hrsg.): Best Management Practice for Management of Used Aircraft Parts and Assemblies and for Recycling of Aircraft Materials. 22. April 2013. http://www.afraassociation.org/AFRAMergedBMP%28ver3_0%29F&S.pdf
- [13] Mallavalon, O. (Fa. Airbus): Aircraft end of life-management – the Airbus experience feedback. Vortrag auf dem First European Aircraft Recycling Symposium. Stuttgart, 12.-13.12.2013.
- [14] Mallavalon, O. (Fa. Airbus): Aircraft end of life-management – the Airbus experience feedback. Vortrag auf dem First European Aircraft Recycling Symposium. Stuttgart, 12.-13.12.2013.
- [15] Asmatulu, E.; Overcash, M.; Twomey, J.: Recycling of Aircraft: State of the Art in 2011. Journal of Industrial Engineering. Vol. 2013, Article ID 960581, Hindawi Publishing Corporation. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/96081>
- [16] Woidasky, J.: Recyclingfähigkeit und End-of-Life-Konzept im Leichtbau. In: Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau. Hanser Verlag, München, 2011, S. 1195f
- [17] N.N.: Windkraft verdrängt Luft- und Raumfahrt als CFK-Abnehmer Nummer eins. In: Kunststoff Information (Zeitschrift), Nr. 2086/ 41. Jahrgang, 5. Dezember 2011, S. 7
- [18] Woidasky, J.: Weiterentwicklung des Recyclings von faserverstärkten Verbunden. In: Thomé-Kozmiensky, K.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe. Band 6. TK-Verlag, Neuruppin, 2013m S. 241 - 259
- [19] Airbus (Hrsg.): Pamela Training Kit – Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft. Blagnac/F, 2008
- [20] Das, S.: Recycling Aluminum Aerospace Alloys. In: Advanced Materials and Processes. March 2008, S. 34-35
- [21] Das, S.: Recycling Aluminum Aerospace Alloys. In: Advanced Materials and Processes. March 2008, S. 34-35
- [22] Noll, R. et al.: Perspektiven der Lasertechnik zur Steigerung der Ressourceneffizienz. In: Teipel, Ulrich (Hrsg.): Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen. Tagungsband. Fraunhofer Verlag. Stuttgart/Pfinztal, 2010; S. 287-298
- [23] N.N.: Sicheres Geschäft. In: Sekundär-Rohstoffe (Zeitschrift), Nr. 9, 2009, S. 10-11
- [24] McConell, V.: Launching the carbon fibre recycling industry. In: Reinforced Plastics.com. March 29, 2010
- [25] McConell, V.: Launching the carbon fibre recycling industry. In: Reinforced Plastics.com. March 29, 2010
- [26] Wood, K.: Carbon Fiber Reclamation: Going commercial. In: Composites world.com. 2. Februar 2010
- [27] N.N.: Fibrecycle Press Release. Project Develops Low Cost Blended Carbon Fibre Yarns and Fabrics. Heanor/UK, April 2011.
- [28] Lery, J.; Müller, T.: Clean Sky Eco Design – Technologies for greener aircraft production and disposal. Vortrag auf dem First European Aircraft Recycling Symposium. Stuttgart, 12.-13.12.2013.
- [29] Mallavalon, O. (Fa. Airbus): Aircraft end of life-management – the Airbus experience feedback. Vortrag auf dem First European Aircraft Recycling Symposium. Stuttgart, 12.-13.12.2013.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Recycling und Rohstoffe – Band 7

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014

ISBN 978-3-944310-09-1

ISBN 978-3-944310-09-1 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2014

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Ginette Teske, Fabian Thiel, Janin Burbott, Cordula Müller,

Katrin Krüger

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.