

Die Luftfahrtindustrie als anthropogenes Rohstofflager

Sebastian Jeanvré und Jörg Woidasky

1.	Lebenszyklus von Flugzeugen	357
2.	Mengenabschätzungen	358
3.	Werkstoffe	359
4.	Herausforderungen	360
4.1.	Technisch: Identifikation von Werkstoffen	361
4.2.	Wirtschaftlich: Marktbedingungen	361
4.3.	Rechtlich: Unbrauchbarmachung von Luftfahrtkomponenten	362
5.	Zusammenfassung	364
6.	Quellen	364

1. Lebenszyklus von Flugzeugen

Flugzeuge sind sowohl während der Nutzungs- als auch während ihrer Nachnutzungsphase eine Quelle hochwertiger Bauteile und Werkstoffe. Anthropogene Lagerstätten potentieller Sekundärrohstoffe sind üblicherweise ortsfest und vergleichsweise leicht zu lokalisieren und zu beschreiben, wie z.B. bei Bauwerken, Infrastrukturen oder auch Ablagerungen. Andere wichtige Stoffströme mit hochwertigen Wertstoffen wie z.B. Kraftfahrzeuge oder Elektro- und Elektronikgeräte sind zwar nicht ortsfest, werden aber durch nationale und internationale Regelungen zumindest in Ansätzen gesteuert. Höchste Mobilität bei gleichzeitig geringer Regelungsdichte finden sich im Bereich der Schifffahrt und der Luftfahrtindustrie.

Gerade in der Luftfahrtindustrie sind die Lebenszyklen der Produkte sehr lang, teilweise liegen sie bei bis zu 60 Jahren. In Bild 1 ist dazu beispielhaft der Lebenszyklus der A320-Familie aufgezeigt. Grundsätzlich ist hinsichtlich der Betrachtung der Rohstoffe aus der Luftfahrtindustrie ein lebenszyklusweiter Ansatz erforderlich: Die Herstellungsphase von Flugzeugen kann Stoffströme aus Sekundärquellen aufnehmen, sowohl für die Produkte selbst als auch für die Betriebsmittel für deren Herstellung. In der Nutzungsphase werden Komponenten ausgetauscht, die aus Gründen der Luftsicherheit endgültig und nachweisbar unbrauchbar gemacht werden müssen und daher bereits aus rechtlichen Gründen zur stofflichen Verwertung bereitstehen müssen. Die endgültige Außerbetriebsetzung der Flugzeuge ermöglicht die Gewinnung hochwertiger Austauschkomponenten sowie aus den restlichen Teilen ein relevantes Wertstoffpotential.

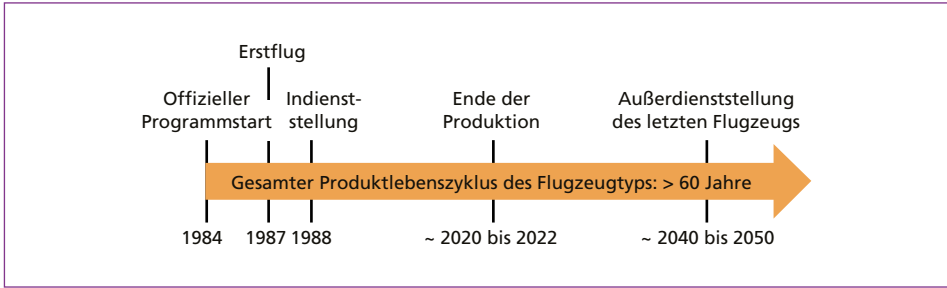


Bild 1: Produktlebenszyklen in der Luftfahrt am Beispiel der Airbus A320-Familie

Quelle: DLR: Produktlebenszyklen in der Luftfahrt am Beispiel des Airbus A320. URL: http://www.dlr.de/fw/Portaldata/42/Resources/dokumente/pdf_dokumente/5PR_01_LF_Technologieentwicklung.pdf. Abrufdatum 23.05.2015

Neben umweltrelevanten Themen wie der Lärmbelastung durch den Luftverkehr, den Verbrauch von Kerosin und den verbrennungsspezifischen Emissionen in höheren Luftschichten tritt zunehmend die Frage auf, ob die in der Luftfahrtindustrie eingesetzten Werkstoffe zukünftig zur Versorgungssicherheit industrialisierter Länder beitragen können. Diese Frage wurde vor allem in Nordamerika praktisch seit dem Ende des zweiten Weltkrieges durch den Aufbau von Lager- und Recyclinginfrastrukturen für gebrauchte Flugzeuge beantwortet. In Europa ist unter anderem aufgrund klimatischer Bedingungen der Betrieb großer Lagerflächen nicht sinnvoll, so dass Altflugzeuge hier schnell demontiert und verwertet werden müssen – sofern sie in Europa verbleiben. Hier erweist sich die hohe Mobilität der Produkte der Luftfahrtindustrie in Verbindung mit globalen Möglichkeiten zur Entsorgung als eine der Herausforderungen einer hochwertigen Kreislaufschließung.

2. Mengenabschätzungen

Von 2016 bis 2035 wird erwartet, dass über 33.000 neue Verkehrsflugzeuge – Passagiermaschinen über 100 Sitze bzw. Düsen-Frachtflugzeuge über 10 Tonnen – in Dienst gestellt werden, davon etwa 650 Frachtflugzeuge. Neben dem Ende der Nutzungsphase ist jedoch auch aus der Nutzungsphase selbst mit Teile- und Werkstoffströmen zu rechnen. Ein Indiz für die Relevanz der Wartungs- und Instandhaltungsaktivitäten (MRO) geben die weltweiten Umsätze dieser Branche, die von 53 Milliarden USD (2015) auf etwa 132 Milliarden USD (2035) steigen werden. Dies entspricht einer jährlichen Steigerungsrate von 4,6 Prozent [1].

Bei den Passagiermaschinen sind 40 Prozent als Ersatz bestehender Flugzeuge erforderlich, die restlichen 60 Prozent dienen der Deckung zusätzlichen Bedarfs. 71 Prozent der Flugzeuge werden *single aisle*-Modelle sein. Im gleichen Zeitraum wird mit der Konversion von 1.234 Passagier- und Frachtflugzeugen sowie mit der Außerdienststellung von 12.834 Flugzeugen gerechnet, d.h. rechnerisch mit etwa 640 Flugzeugen pro Jahr [1]. Bisherige Schätzungen gingen lediglich von etwa 400 Flugzeugen pro Jahr aus [7] (vgl. Bild 2).

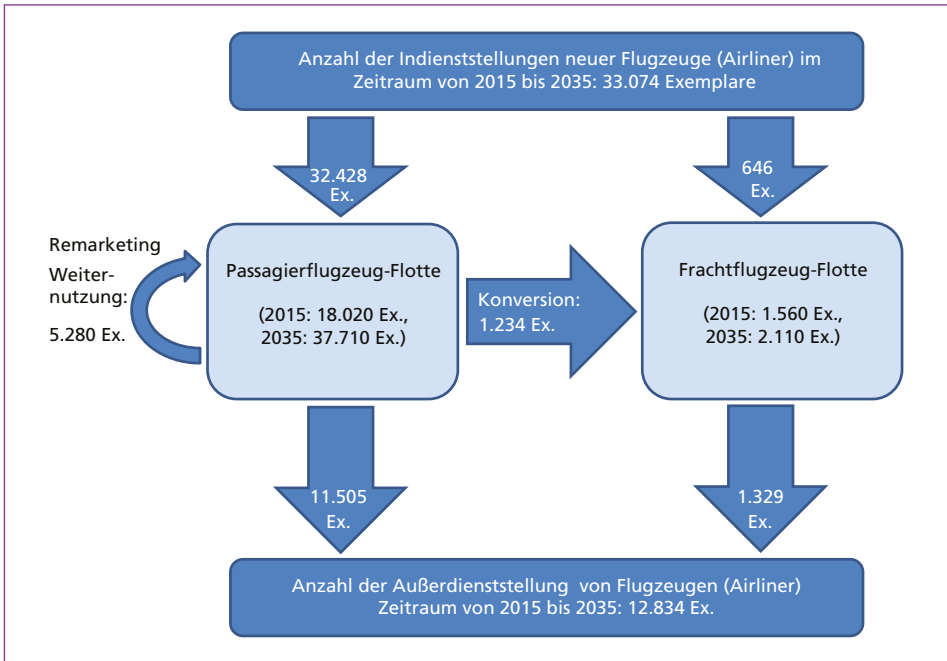


Bild 2: Entwicklungen des weltweiten Flugzeugmarktes 2015 bis 2035

Stückzahlen nach Airbus (Hrsg.): Mapping Demand 2016/2035. Global Market Forecast. Blagnac/France, 3. September 2016

Bedingt durch die mechanischen und thermischen Beanspruchungen sind Triebwerks-Werkstoffe sowohl in technischer wie in wirtschaftlicher Hinsicht die hochwertigsten Materialien im Flugzeug. Im Mittel besitzen Flugzeuge im Mittel 2,1 Turbinen mit einer mittleren Masse von 3 Tonnen, vorrangig aus Nickel- und Titanlegierungen. Somit stehen derzeit knapp 60.000 Tonnen Triebwerkswerkstoffe im Einsatz und in absehbarer Zeit dann auch zur Entsorgung an. Daneben liegt das Werkstoff-Potential von Rumpf- und Flügelwerkstoffen der gesamten Flugzeugflotte bei etwa 1,9 Millionen Tonnen.

3. Werkstoffe

Die in Flugzeugen eingesetzten Werkstoffe zeigt Bild 3 in der Übersicht. Die wichtigsten Werkstoffgruppen sind hierbei neben den metallischen Werkstoffen vor allem Verbundwerkstoffe. Die Relevanz der Verbundwerkstoffe im Flugzeugbau hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen, ob sie jedoch die metallischen Werkstoffe in Strukturbauteilen mittel- bis langfristig ersetzen werden, bleibt abzuwarten.

In Triebwerken werden derzeit und auch in Zukunft aufgrund der kombinierten thermischen und mechanischen Belastungen z.B. Nickelbasis-, Titan- und Stahllegierungen mit wärmeleitenden Edelmetall- und Keramikbeschichtungen eingesetzt. Fahrwerke enthalten Titan- und Edelstahllegierungen, und auch die Strukturbauteile aus diversen Aluminiumlegierungen weisen ein hohes Wertstoffpotential auf.

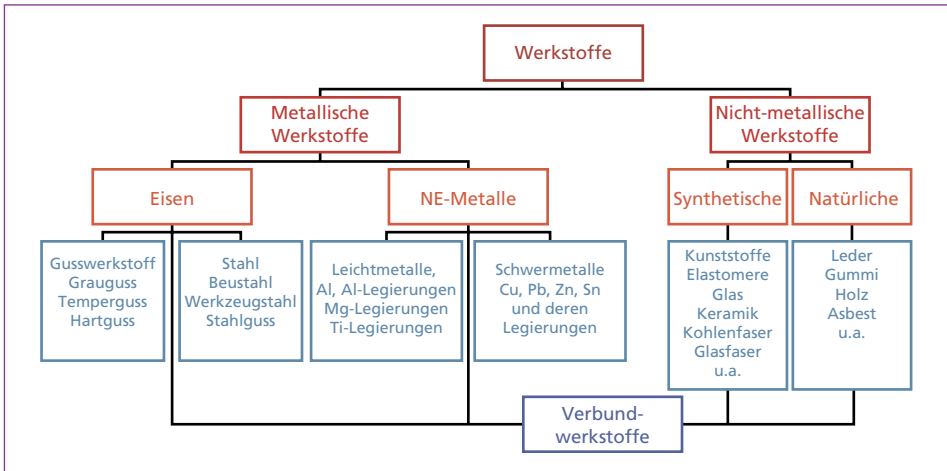


Bild 3: In Flugzeugen eingesetzte Werkstoffe (Übersicht)

Quellen: Götz, C.: Flugzeugrecycling – Analyse bestehender Geschäftsmodelle in den USA und Überprüfung der Übertragbarkeit auf Europa. Interdisziplinäre Projektarbeit. Hochschule Pforzheim, 2016

Jeanvré, S.: Entwicklung eines Verwertungssystems für Altflugzeuge mit Schwerpunkt auf der Schadstoffentfrachtung und dem dezentralen Rückbau. Dissertation an der TU Clausthal-Zellerfeld D104. Papierflieger-Verlag, Clausthal-Zellerfeld, 2015, bearbeitet

Fahrzeuge

Aufgrund der hohen Lebensdauer der Flugzeuge spielen derzeit neue Werkstoffe wie Carbon-Composite zumindest bei Altflugzeugen noch keine Rolle. Allerdings wächst hier der Druck auf Verwertungswege durch die Produktionsabfälle aus Verbundwerkstoffen. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl von Flugzeugtypen mit deren stofflicher Zusammensetzung.

Tabelle 1: Werkstoffeinsatz in ausgewählten Flugzeugtypen

	Einheit	B747	B767	B757	B777	B787	A300
Anzahl derzeit genutzter Flugzeuge dieses Typs		639	802	755	1.239	230	249
Aluminium	t	94,462	56,831	35,209	132,374	5,447	16,191
Stahl	t	15,161	9,946	5,417	20,802	2,724	2,523
Titan	t	4,665	1,421	2,708	13,237	4,085	841
Verbunde	t	1,166	2,131	1,354	20,802	13,618	841
Sonstige Werkstoffe	t	1,166	710	451	1,890	1,362	631
Gesamtmasse	t	116.620	71.039	45.139	189.105	27.236	21.027

4. Herausforderungen

Eine oberflächliche Betrachtung des Massenpotentials und der eingesetzten Werkstoffe könnte zu der Schlussfolgerung führen, dass die Verwertung von Flugzeugen sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht vergleichsweise einfach zu bewerkstelligen und gleichzeitig auch wirtschaftlich sein müsste. Zumindest für Europa

mit seinen derzeit (noch) nicht auf die Bedarfe und Regeln der Luftfahrtindustrie ausgelegten Entsorgungs- und Verwertungsstrukturen lassen sich hier jedoch noch einige schwerwiegende Hindernisse identifizieren. Dies sind insbesondere folgende:

- Im technischen Bereich die sichere, schnelle und kostengünstige Identifikation von verwendeten Werkstoffen, Schadstoffen und Betriebsmitteln unter industriellen Rahmenbedingungen;
- Im wirtschaftlichen Bereich spezifische Marktbedingungen für den Anfall und die Absteuerung von Sekundärrohstoffen und gefährlichen Abfällen, sowie eine im internationalen Vergleich vergleichbare lückenhafte Entsorgungs-Infrastruktur für Altflugzeuge in Europa und
- Im rechtlichen Bereich die Anforderung der technisch und rechtlich unzweifelhaften endgültigen Unbrauchbarmachung nicht wiederverwendbarer Teile vor der stofflichen Verwertung.

4.1. Technisch: Identifikation von Werkstoffen

Die gemeinsame Verarbeitung aller Schrotte aus Altflugzeugen ist weder technisch noch wirtschaftlich aussichtsreich. Untersuchungen zur Herstellung zur zielgerichteten Mischung der Legierungen [2] zeigten gewisse Erfolge. Für die Identifikation von Legierungen, die bei der Demontage oft mit XRF-Handgeräten vorgenommen wird und dann auch als vorbereitenden Arbeitsgang die Entschichtung erfordern, bestehen auch alternative Ansätze. Mit LIBS (Laser-induced breakdown spectroscopy) besteht ein Verfahren, mit dem Aluminiumlegierungen gut erkannt werden können, allerdings sind neben den Erkennungs- auch Handhabungsaufgaben zu lösen und industrielle Durchsätze sicherzustellen.

4.2. Wirtschaftlich: Marktbedingungen

Trotz der zunächst großen Gesamtmasse des Wertstoffpotentials von nahezu zwei Millionen Tonnen entstehen in der Nachnutzungsphase durch die Mobilität der Flugzeuge besondere globale Herausforderungen. Aus sowohl technischer als auch rechtlicher Sicht können flugfähige Flugzeuge global verbracht und entsorgt werden, mit entsprechendem Wettbewerb auch von Wirtschafts-, Arbeitsschutz- und Umweltrichts-Systemen. Einschränkend ist hier jedoch die Anforderung an Demontagebetriebe (*145er Betriebe*) des Luftfahrtrechts zu nennen. Daneben trifft diesen Bereich die Rohstoffpreisfluktuation wie alle anderen Akteure auch. Allerdings wird diese Situation noch durch den Kleinmengen-Anfall – pro Flugzeug im Mittel nur etwa siebzig Tonnen Aluminium verschiedener Legierungen [5] – und den zeitlich und räumlich punktuellen Anfall der Werkstoffe verschärft.

Im Rahmen eines systematischen Vergleiches der Flugzeug-Entsorgungsmärkte in Europa und USA [4] wurden mit den Bereichen Forschung und Entwicklung, Herstellung, Flugzeug-Management, Komponentenhandel, Wartung (Maintenance/Repair/Overhaul – MRO), Demontage, Komponentenmanagement, Zerlegung und Recycling insgesamt neun relevante Geschäftsfelder mit Blick auf Altflugzeuge identifiziert.

Die Recherche nach der Anzahl von Akteuren in diesen Bereichen zeigte insgesamt eine zum Teil deutlich stärkere Position der USA im Vergleich zu Europa (Tabelle 2). Die Gründe für dieses Ungleichgewicht sind vielfältig: Neben dem im Vergleich zu den USA geringeren Flottenalter der europäischen Flugzeugflotten spielen auch die klimatischen Bedingungen in Europa eine Rolle, die längere Abstellzeiten (*Flugzeugfriedhöfe* bzw. *boneyards*) aus Korrosionsgründen kaum erlauben. Die Betrachtung der Unternehmen ergab, dass in den USA und Europa insgesamt 78 Unternehmen (Teil-)Leistungen zum Flugzeugrecycling anbieten. Von diesen Unternehmen haben nur 16 Unternehmen ihren Tätigkeitsschwerpunkt im Flugzeugrecycling – in Europa neun, in den USA sechs Unternehmen. Alle anderen Unternehmen betreiben Flugzeugrecycling nur als Teilbereich neben anderen Aktivitäten. Besonders relevant für den Markterfolg sind insbesondere der Zugang zum Teilehandel und zertifizierten MRO-Aktivitäten, da der Großteil der Wertschöpfung aus Altflugzeugen durch die Wiederverwendung von Komponenten realisiert wird.

Tabelle 2: Handlungsfelder und Anzahl der Unternehmen im Bereich Altflugzeuge in den USA und Europa

Anzahl von Unternehmen (Mehrfachnennungen möglich)	F&E	Herstellung	A/C Management	A/C & KO Händler	MRO	Demon-tage	KO Management	Zerlegung	Recycling
Europa	5	3	2	6	15	15	14	17	22
USA	5	6	7	25	24	19	25	11	18
Summe	10	9	9	31	39	34	39	28	40

Quelle: Götz, C.: Flugzeugrecycling – Analyse bestehender Geschäftsmodelle in den USA und Überprüfung der Übertragbarkeit auf Europa. Interdisziplinäre Projektarbeit. Hochschule Pforzheim, 2016

KO = Komponenten

4.3. Rechtlich: Unbrauchbarmachung von Luftfahrtkomponenten

Neben den nach Prüfung wiederverwendbaren Komponenten sind in einem Flugzeug auch lebensdauerbegrenzte Komponenten verbaut. Diese Teile hoher Sicherheitsrelevanz sind hauptsächlich in den Fahrwerken und Antriebs-elementen zu finden. Die Antriebs-elemente von kommerziellen Flugzeugen sind heutzutage weitestgehend Strahltriebwerke. In diesen Triebwerken, die für den Vorschub der Flugzeuge verantwortlich sind, werden sehr hochpreisige Hochleistungswerkstoffe wie z.B. Superlegierungen, Titanlegierungen oder Carbonfaserwerkstoffe, Aramidgewebe (z.B. Kevlar) verbaut, um den großen mechanischen und thermischen Belastungen standzuhalten.

Diese kommerziell betriebenen Triebwerke müssen nach definierten Umdrehungen, Flugstunden oder Landungen in einer zertifizierten Luftfahrtwerft (EASA Part 145 Approval) gewartet werden. Dabei werden turnusgemäß Bauteile ausgetauscht oder repariert. Diese Werften sind dadurch eine kontinuierliche Anfallstelle für die nicht mehr verwertbaren hochwertigen Sekundärrohstoffe. Die ausgebauten Komponenten können aber nicht ohne eine vorgeschaltete Unbrauchbarmachung in die stoffliche Verwertung der Recyclingbetriebe gehen.

Beim Schrottanfall wird unterschieden zwischen Massenschrotten, die auf Basis der angelieferten Masse unbrauchbar gemacht werden müssen und den serialisierten lebensdauerbegrenzten Bauteilen (Life Limited Parts, LLPs). Bei diesen Bauteilen muss jede Seriennummer vor der Unbrauchbarmachung und stofflichen Verwertung verifiziert und dokumentiert werden. Hintergrund ist die Prävention von Bauteilen zweifelhafter Herkunft (Suspected Unapproved Parts, SUP) die mit krimineller Energie als ein Fälschungsbauteile (Bogus Parts) gehandelt werden könnten. Diese Bauteile können auf dem Schwarzmarkt hohe Preise erzielen und sind sehr risikobehaftet, da durch ihren Einsatz die Qualität und Sicherheit der Flugzeuge nicht mehr gewährleistet werden kann. Als ein Beispiel kann die havarierte Convair 580 aus dem Jahre 1989 angeführt werden: Vier Haltebolzen des Seitenleitwerks hatten nicht die erforderliche Festigkeit und brachen, so dass 50 Menschen dadurch ihr Leben verloren [6].

Der von Cronimet entwickelte Prozess für die Unbrauchbarmachung bis hin zur stofflichen Verwertung setzt sich maßgeblich aus vier Prozessschritten zusammen, die auch in Bild 4 beschrieben sind:

- Definierte und sichere Erfassung an der Anfallstelle (Collection Point) der Luftfahrtwerft,
- Unbrauchbarmachung der Teile einschließlich chemischer Analyse (Destruction and Analysing) der enthaltenen Elemente,
- Aufbereitung und Recycling der Sekundärrohstoffe (Beneficiation and Recycling),
- Überführung in neue Anwendungen z.B. durch den Einsatz im Vakuum-Schmelzwerken (New Application).

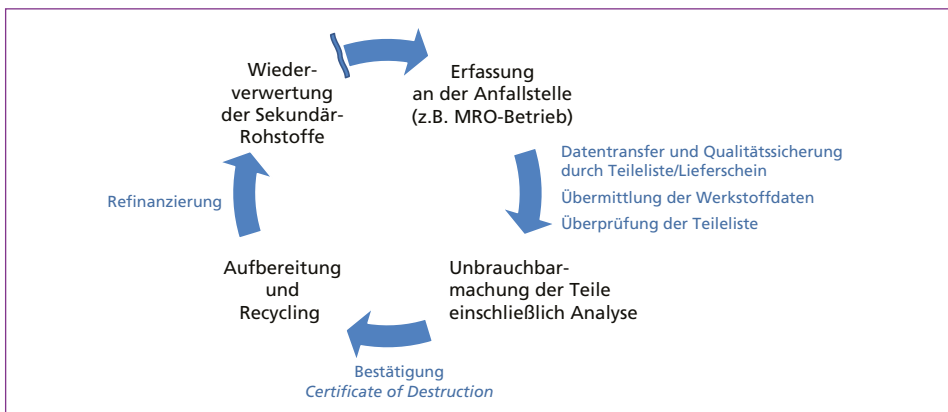


Bild 4: Prozess der Unbrauchbarmachung von serialisierten Luftfahrtkomponenten am Beispiel des Cronimet-Prozesses

Nach dem Prozessschritt der dokumentierten Unbrauchbarmachung können die Materialien bewertet und der stofflichen Verwertung zugeführt werden. Die durchschnittliche Zusammensetzung eines Triebwerk liegt bei etwa vierzig Prozent Nickel-Legierungen, dreißig Prozent Titan-Legierungen, zwanzig Prozent Stählen und zehn Prozent sonstigen Werkstoffen.

5. Zusammenfassung

Derzeit sind weltweit etwa 20.000 kommerzielle Flugzeuge (> 100 Sitze bzw. als Frachtflugzeuge) im Dienst. Die Anzahl der Flugzeuge wird bis 2035 auf etwa 40.000 Exemplare ansteigen. Aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht sind neben den aus Wartungs- und Reparaturvorgängen stammenden Produkt- und Werkstoffströmen insbesondere die Produkte am Ende ihrer Nutzungsdauer von hoher Relevanz. Am Beispiel der Triebwerke mit einer mittleren Masse von 3,1 Tonnen pro Triebwerk ergibt sich beispielhaft ein ungefähres Recyclingpotenzial von weltweit 148.800 Tonnen. Um dieses Potenzial erschließen zu können, müssen technische Herausforderungen (v.a. die Werkstoffidentifikation unter wirtschaftlichen Bedingungen), wirtschaftliche Herausforderungen (Hemmnisse durch Marktentwicklungen und verbesserungsfähige europäische Unternehmensnetzwerke im Altflugzeugbereich) sowie rechtliche Herausforderungen (Unbrauchbarmachung sicherheitsrelevanter Teile) gemeistert werden. Insgesamt bietet die Luftverkehrswirtschaft jedoch eine ausreichend große Wertschöpfung, um das Recycling von den wertvollen Sekundärrohstoffen aus der Nutzungs- und Nachnutzungsphase der Flugzeuge und Triebwerke zu rechtfertigen.

6. Quellen

- [1] Airbus (Hrsg.): Mapping Demand 2016/2035. Global Market Forecast. Blagnac/France, 3. September 2016
- [2] Das, S.: Recycling Aluminum Aerospace Alloys. In: Advanced Materials and Processes. March 2008, S. 34-35
- [3] DLR: Produktlebenszyklen in der Luftfahrt am Beispiel des Airbus A320. URL: http://www.dlr.de/fw/Portaldata/42/Resources/dokumente/pdf_dokumente/5PR_01_LF_Technologieentwicklung.pdf. Abrufdatum 23.05.2015
- [4] Götz, C.: Flugzeugrecycling – Analyse bestehender Geschäftsmodelle in den USA und Überprüfung der Übertragbarkeit auf Europa. Interdisziplinäre Projektarbeit. Hochschule Pforzheim, 2016
- [5] Jeanvré, S.: Entwicklung eines Verwertungssystems für Altflugzeuge mit Schwerpunkt auf der Schadstoffentfrachtung und dem dezentralen Rückbau. Dissertation an der TU Clausthal-Zellerfeld D104. Papierflieger-Verlag, Clausthal-Zellerfeld, 2015
- [6] Report on the Convair 340/580 LN-PAA aircraft accident North of Hirtshals. Denmark, September 8, 1989; URL: <https://www.aibn.no/Aviation/Reports/1993-02-eng>. Abrufdatum 23.12.2016
- [7] Woidasky, J.: Steigflug oder Bruchlandung – Flugzeugrecycling aus abfallwirtschaftlicher Sicht. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe, Band 7. TK Verlag, Neuruppin, 2014, S. 177-188