

Forschendes Lernen Faserverbund (FoLF)

Innovative Technologien & Nachhaltigkeit

Stoffe - Stoffeigenschaften und Recycling

Informationstexte / Begleitliteratur – Recycling verschiedener Werkstoffe



Inhaltsverzeichnis

Einleitung

- 1. Nachhaltigkeit**
- 2. Recyclingverfahren Metall**
- 3. Recyclingverfahren Kunststoffe**
- 4. Recycling von Carbonfasern und CFK**

Fazit

Einleitung

Bei der Betrachtung innovativer Technologien ist es heutzutage notwendig, deren Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen. Ziel ist, dass auch künftige Generationen Entwicklungschancen erhalten bleiben und die soziale Gerechtigkeit voranzubringen. Innovative Technik und nachhaltige Entwicklung stehen dabei in einem Spannungsverhältnis, da einerseits positive Auswirkungen ersichtlich sind, wie die Reduktion des CO₂-Ausstoßes durch Leichtbau im Flugverkehr, andererseits werden durch den Einsatz neuer Technologien neue Probleme hervorgerufen, wie die Entsorgungsproblematik (Recycling) vieler Materialien. Eine nachhaltige Gesellschaft fordert zuverlässige technische Systeme, die sozialen, ökologischen sowie ökonomischen Kriterien entsprechen und die ihr zur Lösung aktueller globaler Herausforderungen zur Verfügung stehen. Das Kriterium der Nachhaltigkeit ist somit notwendigerweise bereits zu Beginn der Entwicklungsprozesse innovativer Technologien mit zu denken.

1. Nachhaltigkeit

„Nachhaltigkeit ist ein wichtiges Prinzip nationaler und internationaler Politik. Es zielt darauf, wirtschaftlichen Wohlstand zu ermöglichen, für sozialen Ausgleich zu sorgen und die natürlichen Lebensgrundlagen für zukünftige Generationen zu erhalten.“¹

Quelle: Bundeszentrale für politische Bildung



3-Säulen der Nachhaltigkeit

Quelle: <http://www.wohnwert-barometer.de/informationen-wwb/nachhaltige-wohnqualitaet/was-ist-nachhaltigkeit.html>

¹ <http://www.bpb.de/izpb/8983/leitbild-der-nachhaltigen-entwicklung?p=all>

Eine Art zu wirtschaften und dabei Ressourcen zu nutzen wird als *nachhaltig* bezeichnet, wenn sie so erfolgt, dass ihre Grundlagen bewahrt werden, so dass dieses Wirtschaften über lange Zeit in einer stabilen Umgebung erfolgreich praktiziert werden kann.

Die Forderung nach Nachhaltigkeit ist eine Ermahnung zum *langfristigen* Denken:

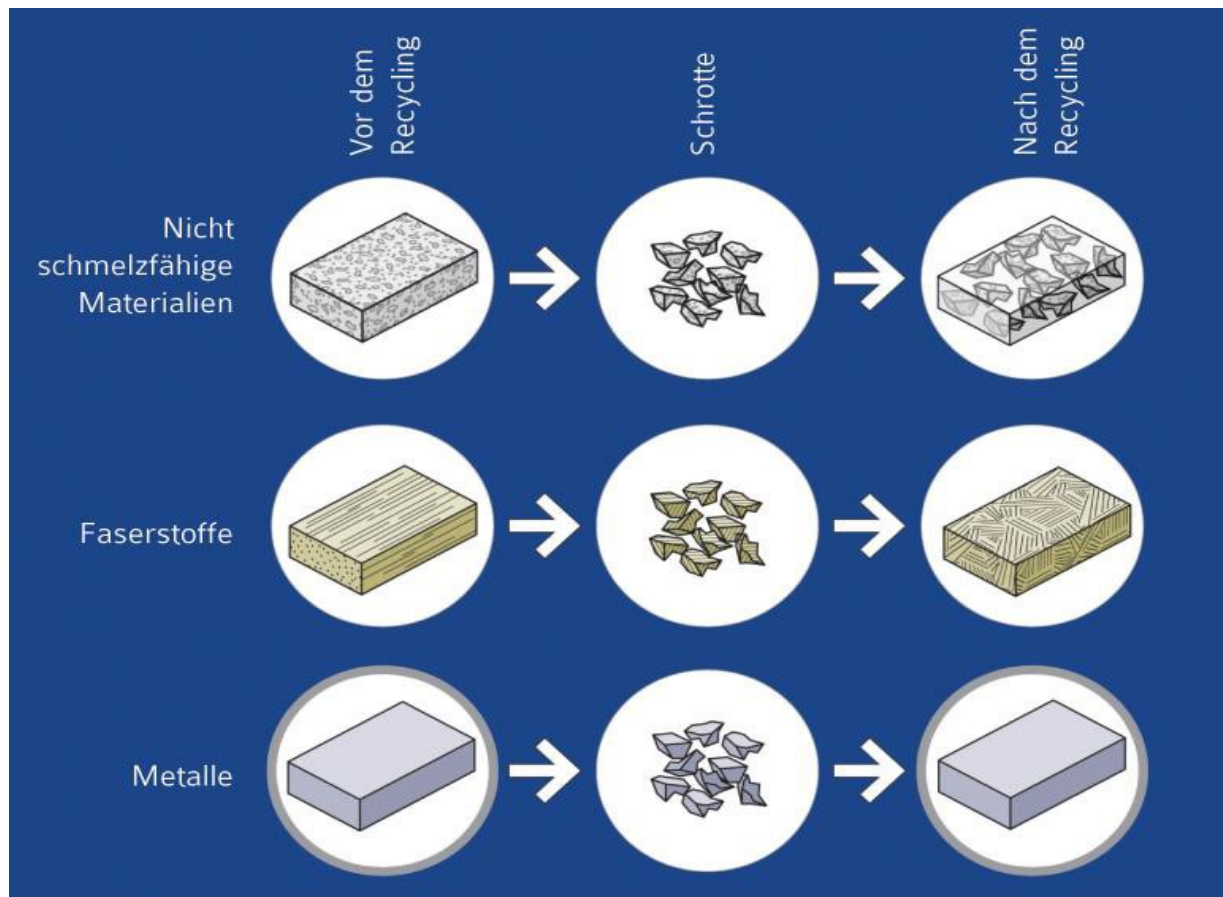
Es soll vermieden werden, dass essenzielle Lebensgrundlagen durch ein kurzfristig orientiertes Handeln unwiederbringlich zerstört werden. Hierzu gehört das Bewusstsein, dass ein nicht nachhaltiges Wirtschaften unter anderem auch die Grundlage derselben Wirtschaft zerstört, also auch ökonomisch nicht durchhaltbar ist. Die Generationengerechtigkeit erfordert offenkundig Nachhaltigkeit in diesem Sinne.²

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ hat eine lange Tradition und Geschichte. Er stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft, genauer gesagt vom sächsischen Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz, und bezeichnet dessen Forderung um 1700 nur so viel Holz zu schlagen, wie auch durch Wiederaufforstung nachwachsen kann. Im sogenannten Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung wurde 1987 eine Definition international geprägt, die bis heute Bedeutung hat:

Nachhaltigkeit ist eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen. Zudem ist Nachhaltigkeit ein integrativer Ansatz, der ökologische, ökonomische und soziale Aspekte ganzheitlich betrachtet. Konkret bedeutet dies laut der Bundesregierung: Umweltschutz, wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und soziale Verantwortung sind so zusammenzuführen, dass Entscheidungen unter allen drei Gesichtspunkten dauerhaft tragfähig sind - in globaler Betrachtung. Die Erhaltung der Tragfähigkeit der Erde bildet die absolute äußere Grenze; in diesem Rahmen ist die Verwirklichung der verschiedenen politischen Ziele zu optimieren.³

² <https://www.energie-lexikon.info/nachhaltigkeit.html>

³ https://www.stmuv.bayern.de/service/faq/anzeige_x.php?id=579



Quelle: <http://zeitschrift.feuerzinken.com/2012-01/index.php?article&5>

2. Recyclingverfahren Metall

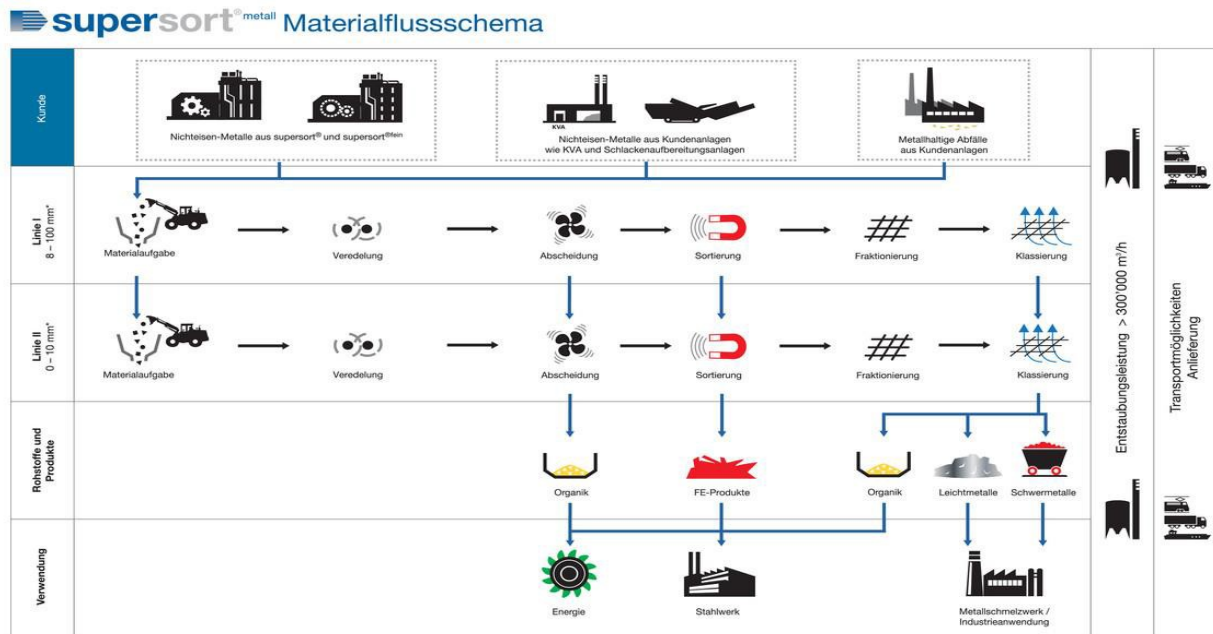
Definition Recycling:

„Jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind“ (§ 3 Abs. 25 deutsches Kreislaufwirtschaftsgesetz).

Metallrecycling vor der Verbrennung

In der **mechanischen Aufbereitung** von Wertstoffgemischen kommen grundsätzlich verschiedene mechanische Aufbereitungs- und Trenntechniken zum Einsatz. Bei der Zerkleinerung werden in der Regel Langsamläufer, Shredder und Hammermühlen angewendet. Für die Klassierung werden Trommelsiebe, linear und flach bewegliche Siebe, Flachsiebe, Bechersiebe und bewegte Roste verwendet. Zur Metallabscheidung sind Überbandmagnetabscheider und Trommelabscheider für Eisen sowie Wirbelstromscheider für Nicht-Eisen (NE) im Einsatz.

In der **Sortierung** werden sensorgestützte Detektionstechniken, z.B. Nahinfrarotspektroskopie (NIR) und automatische Kläubung angewandt. Allen Anlagen gemein ist die Kombination der Techniken zur Zerkleinerung, Klassierung, Metallabscheidung und Sortierung.



Quelle: <http://www.supersort.ch/data/docs/de/2364/%23%23supersort-schema-materialfluss-v3-vect.jpg?variant=13162>

Die bestverfügbare Technik für Abfallaufbereitung beschreibt die Effizienz der Weißblechrückgewinnung mit 98 %. Es bestehen Rückgewinnungsquoten von 81,3 % für Weißblech und 62,5 % für Aluminium. Etwaige Fremdstoffanteile sind hier nicht berücksichtigt. Um diese Daten stichprobenartig zu überprüfen und einen möglichen Fremdstoffanteil zu bestimmen, wurden sowohl eine mechanische Gewerbeabfallaufbereitung sowie eine Anlage zur Aufbereitung der Wertstoffsammlung besucht und Proben von den Metall- und Restfraktionen genommen. In händischen Sortierversuchen und mit Hilfe von Veraschung der organischen Bestandteile konnten die vorhandenen Metallanteile bestimmt werden.

Metallrecycling nach der Verbrennung

Metall wird nach der Verbrennung innerhalb der Schlackeaufbereitung zurückgewonnen. Die konventionelle Schlackeaufbereitung beginnt in Deutschland mit dem Austrag aus dem Nassentschlacker. Nach einer heute in der Regel sehr kurzen Alterung (signifikant kürzer als drei Monate) erfolgt eine Separation in verschiedene Korngrößen und Materialfraktionen. Im Rahmen des Aufteilungsprozesses werden in der Regel mehrere Magnetscheider, Windsichter und Wirbelstromscheider eingesetzt. Gegebenenfalls werden zusätzlich Zerkleinerungsaggregate genutzt. Die Rückgewinnungseffizienz wird von Pretz et al. für **Eisen** mit **92,5 %** und für **NE** mit bis zu **34 %** angegeben. In der Regel beträgt Letztere jedoch nur elf Prozent.

Diese Literaturquelle wurde vielfach zitiert und stellt auch die Grundlage der Bewertung im Rahmen der UBA Studie 2011 zum Planspiel Wertstofftonne dar. Eine neuere Untersuchung, so z.B. die Untersuchung von Deike und Ebert 2012, beschreibt den aktuellen Stand der Technik mit einer Recyclingquote von **92,7 % für alle Metalle**. In der bestverfügbaren Technik (BVT) ist die Metallrückgewinnung der Schlackeaufbereitung mit **55 bis 60 % für Eisen** und

mit **50 % für NE** beschrieben. Da die hier genannten Zahlen signifikant unterschiedliche Quoten ergäben, wurden innerhalb der hier vorgestellten Studie deutsche Schlackeaufbereiter und Abfallverbrenner zum aktuell praktizierten Stand der Technik der Schlackeaufbereitung befragt. Die Befragung wurde mit hohem Erfolg durchgeführt, so dass die beantworteten Fragebögen vier Millionen Tonnen der fünf Millionen Tonnen in 2012 repräsentieren. Demnach lässt sich eine gute Anlage wie folgt charakterisieren: Aus der Schlacke werden mit Hilfe von vier Magnetabscheidern 7,6 % Eisen zurückgewonnen. Mit drei NE -Abscheidern werden 1,7 % NE-Metalle abgeschieden. Die Aufbereitung der Schlacke erfolgt nach vier Wochen Alterung. Schlacke kleiner zwei Millimeter wird abgesiebt und keiner Aufbereitung mehr zugeführt. Der Anteil an Unverbranntem liegt bei 0,75 %. Als Outputfraktionen werden Eisen in verschiedenen Größenfraktionen (grob, mittel und fein), Edelstahl (VA), Messing, Kupfer, Mischmetall verschiedener Körnung sowie E-Motoren zurückgewonnen. Während die Eisenfraktionen nur geringe Schuttabzüge aufweisen, werden im NE-Mischmetall Schuttabzüge zwischen 15 % und 60 % verzeichnet.

Recyclingverfahren Aluminium

Aluminium (Al) kann sehr leicht wiederverwertet werden. Es kann nach Gebrauch beliebig oft eingeschmolzen werden ohne Qualitätseinbußen hinnehmen zu müssen.

Bei der Herstellung von Sekundäraluminium werden nur ca. 5% der Energie, welche für die Herstellung von Primäraluminium erforderlich ist, benötigt.

Als **Primäraluminium** wird Aluminium bezeichnet, das durch Schmelzflusselektrolyse aus Aluminiumoxid erzeugt wird, das man seinerseits aus dem Aluminium- Erz Bauxit gewinnt.

„Primär bezeichnet die Tatsache, dass dieses Aluminium direkt aus dem Rohstoff, also erstmals rein hergestellt worden ist.“⁴

Aluminium, welches durch Umschmelzen von Schrott entsteht, wird in der Technik als **Sekundäraluminium** bezeichnet.⁵

Die Separation der Al-Werkstoffe aus unterschiedlichen Schrotten ist oft problemlos möglich.

Entwicklung der deutschen Sekundäraluminiumindustrie⁶

Eine systematische Forschung in Bezug auf die Technologie und Legierungsentwicklung des Aluminiums begann Anfang der 20er Jahre. Die Produktion von Sekundäraluminium beginnt in Deutschland gegen Ende des ersten Weltkrieges mit der Wiederverwertung des anfallenden Flugzeugschrottes. Die industrielle Produktion erfolgte Anfang der 30er Jahre, weil nun erstmals die für eine industrielle Wiedergewinnung notwendige Menge an Schrott zur Verfügung stand. Die Produktion von Sekundäraluminium wird 1920 in Deutschland auf etwa 3.000 Tonnen geschätzt, vervierfachte sich aber bereits 10 Jahre später auf etwa 12.000 Tonnen. 1998 lag die Produktion von Sekundäraluminium bei mehr als 450.000 Tonnen und erreichte 2007 einen Höchststand von über 850.000 Tonnen (inzwischen bzw. in den Jahren 2010 – 2015 liegt die Produktion zwischen rund 600.000 und 635.000 Tonnen).⁷

Bei Aluminiumverpackungen liegt die Recyclingquote, bedingt durch verschiedene Sammel- und Sortierprobleme, deutlich niedriger als in den anderen oben erwähnten Bereichen.

Da hier erhebliche Potentiale für Einsparungen und Verbesserungen möglich sind, versucht der Gesetzgeber zu einer Erhöhung der Recyclingquoten beizutragen. So soll z.B. die

⁴ <http://www.aluinfo.de/index.php/alu-lexikon.html?lid=69>

⁵ <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/aluminium/73-sekundaeraluminium>

⁶ Die folgenden Erläuterungen basieren auf Dudek, Thomas: Recycling von Aluminium. 2010

⁷ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197960/umfrage/produktion-von-primar-und-sekundaeraluminium-in-deutschland/>

Verpackungsrichtlinie der EU die Einführung und Verbesserung von Sammel- und Sortiersystemen in ganz Europa bewirken.



Quelle: <http://valorlux.lu/de/aluminium>

Recyclingkreisläufe des Aluminiums

Geschlossene Stoffkreisläufe ergeben sich einerseits durch die Wiederverwendung oder die Weiterverwendung von Produkten (Produktrecycling), andererseits durch die Wieder- bzw. Weiterverwertung von Alt- und Reststoffen (Materialrecycling).

Auch die energetische Weiterverwertung des Energiegehaltes eines Materials kann als eine Form des Recyclings angesehen werden (Energiercycling).

Für die Aluminiumbranche ist insbesondere die Wiederverwertungsstrategie von großer Bedeutung, da Aluminium ohne Qualitätsverlust umgeschmolzen und erneut verwendet werden kann.

Beim Aluminiumrecycling kann man sogenannte geschlossene Recyclingkreisläufe (closed-loop-recycling) von Offenen (open-loop-recycling) unterscheiden.

Geschlossene Kreisläufe liegen vor, wenn der Schrott einem vergleichbaren Wiedereinsatz zugeführt wird, z.B. bei Aluminiumgetränkedosen und –fensterrahmen. Die Rückgewinnung erfolgt mit nur einem geringen Neumetallanteil zum Ausgleich der Verluste aus Nutzung, Sammlung, Aufbereitung und dem eigentlichen Umschmelzen.

Open-loop-recycling besteht, wenn sekundäre Rohstoffe nach der Verhüttung einer anderen Nutzung, meist auch in Form einer anderen Legierung, zugeführt werden. Hier sind z.B. die Erstellung von Gusslegierungen aus Alt- und Neuschrotten für die Automobilindustrie zu nennen. Weitere Anwendungen von Sekundäraluminium bestehen in der Nutzung des Metallverbrauchs als Chemikalie wie z.B. bei der Desoxidation von Stahl. Dieses Aluminium kann nach der Nutzung nicht zurückgewonnen werden.

Neben diesen „idealisierten“ Recyclingkreisläufen existiert ein fließender Übergangsbereich in stofflicher und räumlicher Hinsicht.

In der Aluminiumrecycling-Industrie werden verschiedene Arten von Aluminiumschrott verarbeitet. Eine erste grobe Unterteilung erfolgt in Fabrikations- oder Neuschrott und Altschrott. Bei Fabrikationsschrott handelt es sich um Aluminiumabfälle, die bei der Verarbeitung und Herstellung von Aluminiumlegierungen und –anwendungen anfallen. Sie kommen direkt vom Produzenten und somit ist die Zusammensetzung ihrer Legierung bekannt. Meist ist dieser Schrott nicht verunreinigt. Ein Teil des Schrottes kann allerdings bereits lackiert oder gefettet sein, so dass eine Behandlung vor der Umschmelzung erforderlich wird.

Neuschrotte werden zu 100% von der Aluminiumindustrie umgeschmolzen.

Altschrotte werden aus gebrauchten Endprodukten und Bauteilen gewonnen. Diese stammen z.B. aus dem Bauwesen, von ausgedienten Fahrzeugen, elektrotechnischen Geräten, Maschinen, Haushaltswaren oder benutzten Getränkedosen.

- **Vorstoffe**

Vorstoffe des Aluminiumrecyclings sind Materialien die Aluminium in metallischer Form enthalten und werden unterteilt in Neuschrotte, Altschrotte, Späne, Krätzen/Skimmings und Vorschmolz.

- **Neuschrotte**

Neuschrotte (new scrap, fabrication or process scrap) fallen bei der Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen an.

In der ersten Stufe der Verarbeitung fallen Schrotte durch die Produktion an (Erzeugung von Halbzeugen und Formguss). Diese Schrotte sind sortenrein und in ihrer Zusammensetzung bekannt, somit können sie durch internes Recycling direkt in den Betrieben wieder dem Produktionsprozess zugeführt werden.

Eine weitere Verarbeitung der sekundären Vorstoffe findet in den Aluminium-Umschmelzwerken, den sogenannten Remeltern statt. Remelter produzieren überwiegend Aluminiumknetlegierungen.

Die bei der zweiten Produktionsstufe, d.h. bei der Endfertigung anfallenden Vorstoffe reichen von sortenreinen, stückigen Produktionsresten bis zu stark verunreinigten, vermischten Spänen. Ein Großteil dieser Schrotte ist lackiert, elektrochemisch beschichtet oder mit Emulsion behaftet, sodass eine Aufarbeitung erforderlich wird. Da die Betriebe diese Aufarbeitung nicht in jedem Fall leisten können, erfolgt eine Weiterverarbeitung dieser Vorstoffe überwiegend in Aluminium-Schmelzwerken, den Refinern. Refiner produzieren Aluminiumgusslegierungen.

- **Altschrotte**

Gelangen aluminiumhaltige Materialien erst nach ihrer Nutzung wieder in den Recyclingkreislauf, spricht man von Altschrotten (post consumer scrap, old scrap oder obsolete scrap).

Altschrotte sind entsprechend vielfältig und reichen von geschredderten Altautomobilen über Kabel- oder Drahtschrotten, Getränkedosen (UBC – used beverage cans) bis hin zu Verpackungen des DSD (Duales System Deutschland).

Problematisch sind Altschrotte vor allen Dingen aufgrund ihrer anhaftenden Verunreinigungen und der Legierungsvielfalt der Materialien. Oft ist hier keine einfache Zuordnung der Schrotte zu bestimmten Legierungen möglich.

Die Sortierung hat einen wichtigen Einfluss auf die Erhaltung des ursprünglichen Materialwertes. Dank immer höher entwickelter Sortierverfahren, die von der einfach Handsortierung bis hin zur Wirbelstromtrennung reichen, kann heutzutage ein großer Teil des Altschrotts einheitlich und gut sortiert werden. Sofern die Schrottcharge aus der mehr oder weniger gleichen Legierungsart besteht, werden hieraus Knetlegierungen, Pressbolzen und Walzbarren hergestellt. Die Verarbeitung erfolgt, mit Ausnahme der UBCs fast ausschließlich in Aluminium-Schmelzwerken (Refiner).

- **Späne**

Späne sind in der Regel Neuschrotte, die bei der spanenden Bearbeitung von Aluminiumprodukten anfallen. Sie liegen, je nach angewandtem Zerspanungsprozess, in sehr unterschiedlicher Form, Feinheit und Reinheit vor.

- **Krätzen/Skimmings**

Krätzen sind aluminiumhaltige Reststoffe, die sich beim Einschmelzen von Aluminium an der Badoberfläche bilden. Prinzipiell sind sie den Neuschrotten zuzuordnen.

In der Krätze ist etwa 60% bis 70% Aluminium enthalten. Ihre Verarbeitung erfolgt direkt oder nach vorheriger mechanischer Aufbereitung in den Schmelzwerken.

Um Verluste durch Abtrennung zu vermeiden, ist Krätze so schnell wie möglich abzukühlen und zu verarbeiten. Sie darf nur kurz gelagert und muss unbedingt trocken gehalten werden, da kleine Metallpartikel sonst mit Wasser reagieren und Oxide bilden könnten.

Um Oxidationsverluste zu verhindern, wird die Krätze beim Einschmelzen mit einem Gemisch aus Salzen abgedeckt, wobei allerdings erhebliche Mengen an Salzschlacken anfallen.

Weiterentwickelte Verfahren zur Vermeidung der Salzschlackenbildung sind:

- Die Plasmatechnologie (Abkühlen der Krätze unter Argon- oder Stickstoffplasma)
- Das Lichtbogenverfahren (beim Krätzeerschmelzen wird die Energie über einen Lichtbogen zwischen zwei Elektroden eingebracht)
- Einsatz von Sauerstoff-Gas-Brennern zum Ausschmelzen der Krätze
- Zentrifugieren der Krätze.

- **Vorschmolz**

Wenn stark verunreinigte und in der Legierungszusammensetzung unbekannte Aluminiumlegierungen zusammen umgeschmolzen, so wird das Produkt als Vorschmolz (RSI = recycled secondary ingots) bezeichnet.

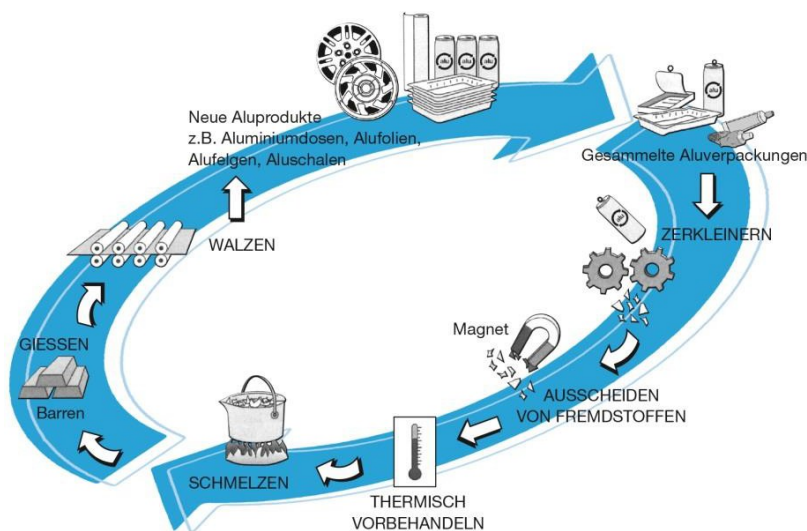
Die Vorschmolz dient als Vormaterial für die Herstellung von Umschmelzlegierungen.

Der Recyclingprozess

Je nach Schrotart umfasst der Recyclingprozess folgende Schritte:

1. Sammlung
2. Sortieren und Aufbereiten der Schrotte
3. Umschmelzen und Raffination
4. Giessen ins Lieferformat

1 Sammlung



Grafische Darstellung eines Sammelsystems

https://www.igora.ch/files/recyclingkreislauf_dosen-schalen-tuben_d.jpg

Die Verfügbarkeit von gebrauchten Aluminiumerzeugnissen sowie die Menge Aluminium, welche gesammelt werden kann, bestimmen die Menge Metall, das zu einem bestimmten Zeitpunkt zurückgewonnen werden kann.

Der anfallende Neuschrott wird von der Aluminiumindustrie zu 100% umgeschmolzen.

In Europa existieren derzeit eine ganze Reihe leistungsfähige Sammel- und Recyclingprogramme. Die Recyclingquoten sind sehr hoch und liegen in der Automobilindustrie bei ca. 95%, in der Bauindustrie bei 90%.

Lediglich bei Aluminiumverpackungen liegen die Quoten nicht so hoch, obwohl die Industrie in allen größeren europäischen Ländern eine ganze Reihe von Initiativen unternommen hat, um diese zu erhöhen. Gesamteuropäisch liegt die Quote für den Aluminiumrückgewinnung im Verpackungssektor (durch Recycling oder die Verwertung der Energie) bei 40% (2005)

2 Sortieren und Aufbereiten der Schrotte

Die Aufbereitung von Aluminiumhaltigen Vorstoffen und Aluminiumschrotten umfasst alle Maßnahmen, die vor dem Umschmelzvorgang notwendig werden.

Im Wesentlichen umfasst die Aufbereitung folgende Arbeitsschritte:

- Als Vorbereitung für weitere Arbeiten und zur Erleichterung der Handhabung erfolgt im ersten Schritt eine
 - Zerkleinerung und/oder
 - Agglomeration

- In einem weiteren Schritt erfolgt die notwendige Abtrennung von metallischen und nichtmetallischen Fremdbestandteilen sowie eine Trennung nach Stückgrößen durch mechanische Verfahren;
 - Klassierung und/oder
 - Sortierung
 - Magnet (Magnetabscheider)
 - Induktion (Wirbelstromverfahren)
 - Dichte (Schwimm-Sink-Anlage)

- Je nach Qualität und Anteil an Verunreinigungen in Form von anderen Materialien, z.B. Lacken, Farben, Öl, usw., werden die Schrotte in einem letzten Schritt von ihrer Beschichtung befreit, durch:
 - Waschen oder
 - Thermische Behandlung
 - Separate Anlagen
 - Im Schmelzprozess

Die Aufbereitung, insbesondere die Sortierung der Aluminiumvorstoffe hat einen wichtigen Einfluss auf die Erhaltung des ursprünglichen Materialwertes.

Vielfach werden z.B. Gusslegierungen mit einem relativ hohen Siliziumgehalt zusammen mit Knetlegierungen eingeschmolzen. Das daraus entstehende Gemisch ist, aufgrund seines hohen Siliziumgehaltes nur noch als Ausgangsstoff für Gusslegierungen verwendbar.

3 Umschmelzen

Zum Umschmelzen der aufbereiteten Aluminiumschrotte gibt es, je nach dessen Zusammensetzung, zwei Hauptverfahrenstechniken, das „reine Umschmelzverfahren“ und das „kombinierte Verfahren“.

Reine Umschmelzverfahren können mit Hilfe von

- Drehtrommelofen
- Induktionsofen oder
- Herdofen

erfolgen.

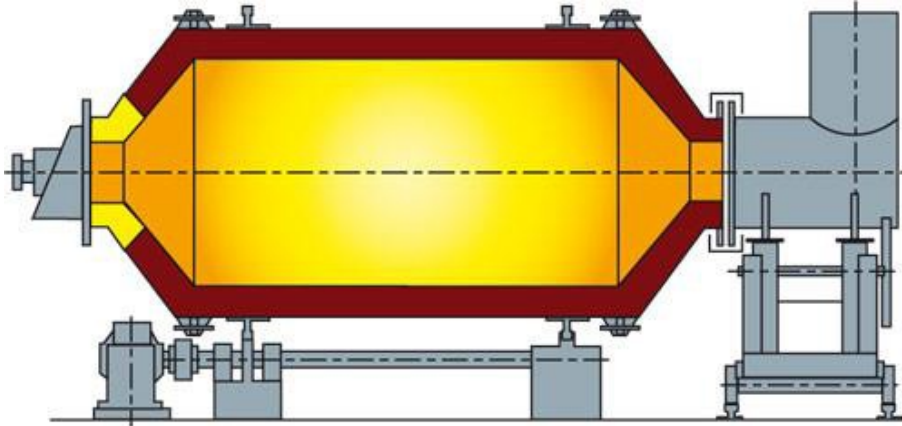
Bei den kombinierten Verfahren wird zwischen dem

- Zweikammerverfahren und der

- Pyrolyse - Blankglühen – Schmelzen unterschieden.

- **Reine Umschmelzverfahren**

Drehtrommelofen



<http://www.insertec.biz/images/insertec-es/soluciones-refractarias/fundicion-hierro/horno-rotativo-fundicion-hierro-dib.jpg>

Reines Umschmelzen im Drehtrommelofen wird meist für Aluminiumschrott mit starken Verunreinigungen angewendet.

Bei diesem Verfahren wird zum Aluminiumschrott eine große Menge an Salzen (NaCl / KCl-Gemisch, ca. 500kg pro Tonne Al) zugesetzt.

Dann wird, unter langsamen rotieren der Trommel um die waagerechte Achse, das Gemenge geschmolzen, wobei sich das Aluminium von den Verunreinigungen trennen lässt. Das Verfahren erzeugt Aluminium bester Qualität.

Induktionsofen

Ebenfalls zur Erwärmung und Aufschmelzung von Aluminiumschrotten werden Induktionsofen verwendet. Sie funktionieren nach dem Prinzip, dass Wechselstrom in eine Spule (Induktor) im Ofen geleitet wird, um dadurch das Aluminium, welches sich in der Mitte der Spule befindet, mittels Wirbelströmen zu erhitzen.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Öfen ist keine vorhergehende Erwärmung der Heizelemente und Ofenwände erforderlich, weil nur das Metall selbst erhitzt wird.

Damit ist die Schmelzleistung eines solchen Ofens sehr hoch.

Herdofen

Das Dritte Verfahren zum Umschmelzen des Aluminiums bildet die Technik des Herdofens. Hierbei wird eine flache Wanne (auch „Wannenofen“) von oben mit einer Flamme beheizt und somit das Metall umgeschmolzen.

Nachteilig bei diesem Verfahren ist die, bedingt durch die große Oberfläche der beheizten Fläche, hohe Oxidation. Vorteilhaft ist jedoch der hohe Durchsatz.

Herdöfen werden vor allem beim Stranggießen eingesetzt.

- **Kombinierte Verfahren**

Pyrolyse - Blankglühen - Schmelzen



anfallenden Gase. Nachteilig ist, dass dieses Verfahren ca. 10% teurer als herkömmliche Verfahren ist.

Kombinierte Verfahren wie zum Beispiel das „Pyrolyse-Blankglühen-Schmelzen“ werden idealerweise bei Verbundwerkstoffen verwendet. Pyrolyse und Verbrennung sind bei diesem Verfahren getrennt und die Energieinhalte der Pyrolysegase können genutzt werden. Vorteile sind hier ebenfalls die geringen Metallverluste sowie die vollständige Erfassung und Reinigung der im System vorhandenen bzw.

Zweikammerverfahren

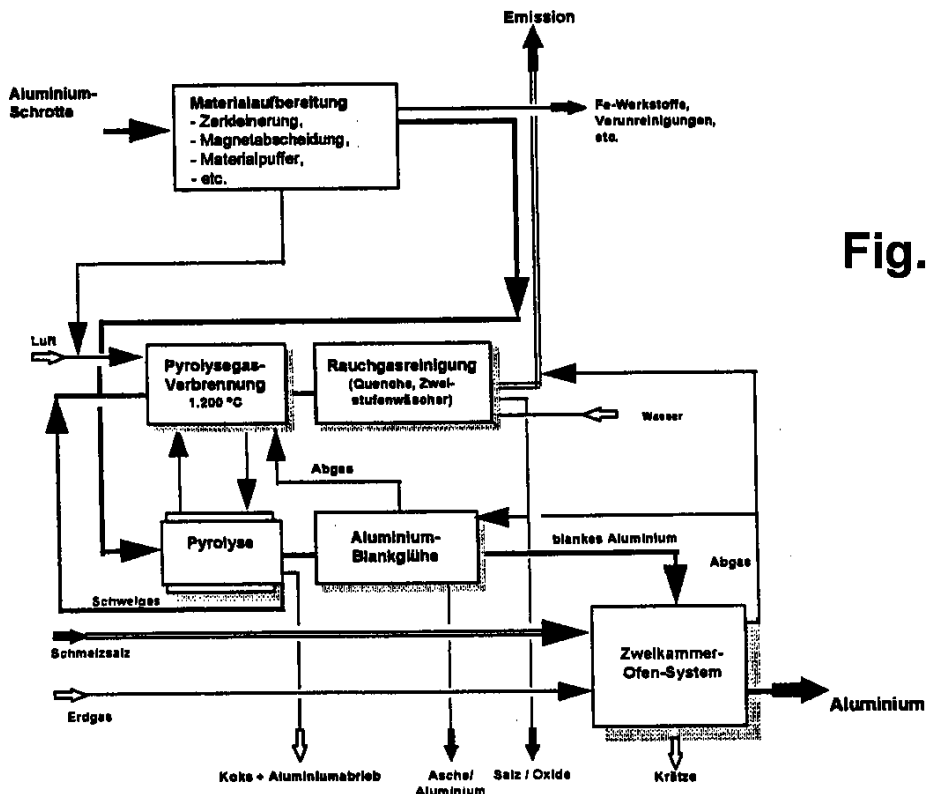


Fig.1

<https://data.epo.org/publication-server/image?imageName=imgaf001&docId=5288611>

Die Vorteile des „Pyrolyse-Blankglühen-Schmelzen“ weist auch das Zweikammerverfahren auf, wo hauptsächlich lackierte, verölte und dünnwandige Schrotte aufgearbeitet werden. Bei allen Techniken und Verfahren ist es wichtig, den Kontakt des Aluminiums mit der Luft möglichst zu vermeiden, da Aluminium, als unedles Metall, sich sofort bei hohen Temperaturen zum Oxid umsetzt.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte des Aluminiumrecycling sind stichpunktartig zusammengefasst:

- Aluminium kann theoretisch immer wieder recycelt werden.
- Aluminium-Schrotte sind ein Wirtschaftsgut mit einem sehr hohen Werterhaltungsgrad.
- Die sehr gute Recycelbarkeit des Aluminiums stellt eine bedeutende Ressourcenschonung dar.
- Aluminium ist eine „Energiebank“, die Herstellungenergie bleibt beim Recycling erhalten.
- Beim Recycling von Aluminium wird bis zu 95% der bei der Erstproduktion eingesetzten Energie eingespart.
- Recyceltes Aluminium findet in nahezu allen technischen Anwendungsgebieten Verwendung. Es müssen keine speziellen Märkte gesucht und erschlossen werden.
- Die Recyclingquoten sind in Europa sehr hoch, dennoch ist die Branche bemüht diese weiterhin zu verbessern
- Spezielle Logistikkonzepte, sowie Separations- und Aufbereitungsverfahren bilden die wesentlichen technischen Parameter für das Recycling von Aluminium.⁸

⁸Dudek, Thomas: Recycling von Aluminium

3. Recyclingverfahren Kunststoffe

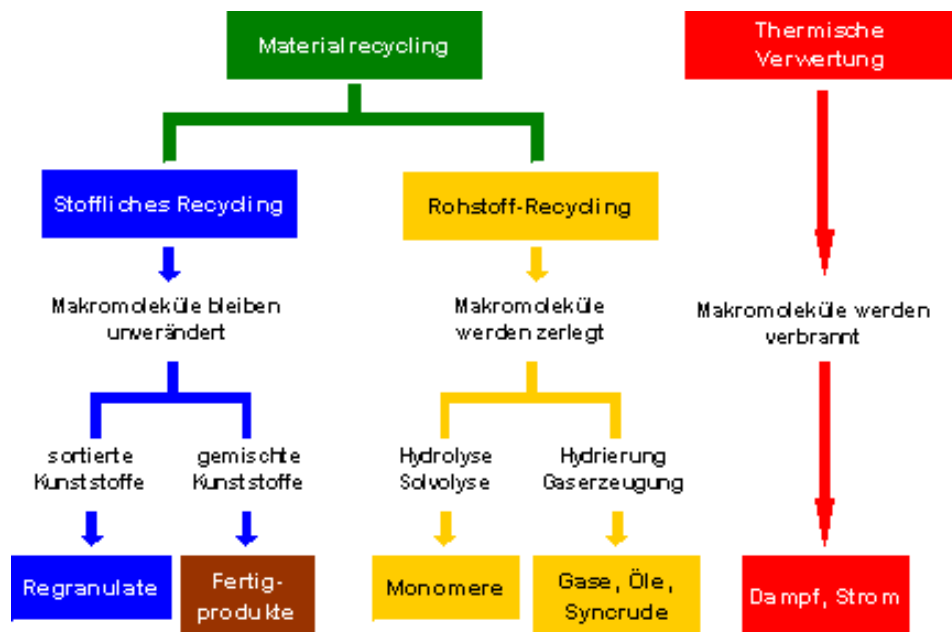
Ein großer Teil der produzierten Kunststoffe fällt schon nach relativ kurzer Zeit als Abfall zur Entsorgung oder Wiederverwertung an.

Entsorgt werden kann der Kunststoffabfall auf Deponien und in Verbrennungsanlagen. Kunststoffabfall auf Deponien zu lagern ist allerdings die schlechteste Lösung, denn das Material wird dann jeder weiteren Nutzung entzogen. In den Verbrennungsanlagen dient der Kunststoffabfall als Ersatz für Primärbrennstoffe (Kohle, Erdöl, Gas). Die entstehende Verbrennungswärme wird genutzt als Fernwärme, zur Dampfproduktion oder zur Stromerzeugung.

Das Wiederverwerten (Recycling) kann in zwei Bereiche unterteilt werden:

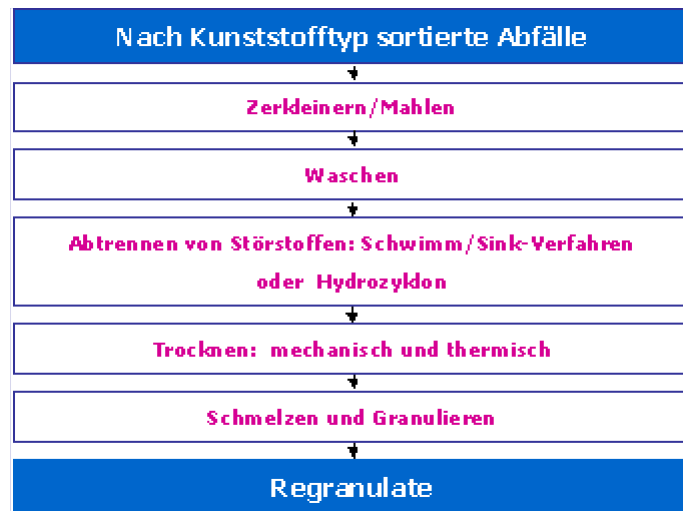
- Materielles oder werkstoffliches Recycling
- Rohstoffliches (chemisches) Recycling

Bei der stofflichen Verwertung bleiben die Kunststoffe als Material erhalten, d. h. die Makromoleküle bleiben unverändert.⁹



Quelle: <http://www.technikatlas.de/~tb4/recycling.htm>

⁹ <http://www.technikatlas.de/~tb4/recycling.htm#Methoden>



Quelle: <http://technikatlas.de/~tb4/materiell.htm>

Dieses Verfahren ist für alle thermoplastischen Kunststoffe anwendbar (80% der Kunststoffe). Diese Art des Recyclings entspricht völlig den auch von traditionellen Werkstoffen wie Glas oder Metallen her bekannten Verfahren.

Die stoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen ist in manchen Fällen recht kostenintensiv. Vieles was technisch lösbar ist, ist unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten nicht mehr sinnvoll.¹⁰

Bei dieser Recyclingart werden die riesigen Kunststoff-Molekülketten durch chemische Veränderungen in kleine Einzelteile zerlegt. Die so gewonnenen Grundstoffe können dann wieder zur Erzeugung neuer (auch anderer) Produkte eingesetzt werden. Durch bestimmte chemische Reaktionen werden aus Kunststoffen wieder Rohstoffe - daher die Bezeichnung „**chemisches**“ oder auch „**rohstoffliches Recycling**“. In der Praxis stehen für die Zerlegung der Kunststoffe folgende technische Verfahren zur Verfügung:

- Hydrierung
- Hydrolyse
- Pyrolyse

Hydrierung

Bei der Hydrierung werden Kunststoffe unter hohem Druck und bei Temperaturen von rund 500° C mit Wasserstoff behandelt. Dabei kommt es zur Spaltung der Kunststoffmoleküle und der Wasserstoff lagert sich an die Bruchstücke an. Als Recyclingprodukt fällt ein erdölähnliches Gemisch an. In einer normalen Raffinerie werden daraus Kraftstoffe, Heizöle und Rohstoffe für die Kunststoffproduktion gewonnen.

Für eine Verwertung durch Hydrierung eignen sich alle Kunststoffe. Eine vorherige Sortierung der Kunststoffe ist nicht notwendig.

¹⁰ <http://technikatlas.de/~tb4/materiell.htm>

Hydrolyse

Bestimmte Kunststoffe lassen sich durch Einwirkung von Wasserdampf unter hohem Druck und hoher Temperatur aufspalten und zwar genau in jene "Bausteine" aus denen sie hergestellt wurden. Die Spaltprodukte können nach ihrer Reinigung wieder zur Herstellung genau des gleichen Kunststoffes eingesetzt werden, aus dem sie gewonnen wurden. Dieses Verfahren nennt man Hydrolyse (*griech.* hydor = Wasser, *griech.* lyein = lösen).

Im Gegensatz zur Hydrierung eignen sich für die Hydrolyse nur bestimmte Kunststoffe: Sie müssen im Verlauf ihrer Molekülketten in regelmäßigen Abständen leicht trennbare Stellen aufweisen. An diesen Stellen tritt bei gezielter Einwirkung von Wasser die gewünschte Spaltung ein.

Die folgenden, bekannten Kunststoffe eignen sich für eine Wiederverwertung durch Hydrolyse oder Alkoholyse:

- Polyester (z. B. PET)
- Polyamide (z.B. Nylon)
- Polyurethane
- Polycarbonate

Pyrolyse

Bei der Pyrolyse (*griech.* pyr = Feuer, *griech.* lyein = lösen) wird der Kunststoff unter Sauerstoff-Ausschluss (Luftabschluss) zersetzt. Der Kunststoff wird nicht verbrannt sondern in petrochemische Grundstoffe zerlegt. Die langen Molekülketten werden aufgebrochen und es entstehen niedermolekulare Fragmente. Der Altkunststoff wird durch diesen Prozess zunächst in Synthesegas (CO, H₂) und anschließend in Methanol umgewandelt.

Dieses Verfahren ist besonders umweltfreundlich und kann auf fast alle Kunststoffe angewandt werden.¹¹

Kunststoffe werden in **drei Hauptgruppen** unterteilt¹²:

1. Thermoplaste

sind Kunststoffe, deren Makromoleküle aus linearen oder wenig verzweigten Ketten bestehen und durch zwischenmolekulare Kräfte zusammengehalten werden. Thermoplaste werden bei Erwärmung weich und verformbar.

2. Duroplaste

sind aus kettenförmigen Makromolekülen aufgebaut, die untereinander zu einem dreidimensionalen Netz verbunden sind. Durch diese Vernetzung lassen Duroplaste keine Dehnung zu. Außerdem sind sie unlöslich und unschmelzbar.

3. Elastomere

sind formfest, aber plastisch reversibel verformbar, da sie nur sehr weitmaschig vernetzt sind. Abhängig von der Temperaturstabilität sind Elastomere entweder in chemisch vernetzte oder thermoplastische Elastomere zu unterscheiden. Darüber hinaus sind sie wie die Duroplaste nicht schmelzbar.

¹¹ <http://technikatlas.de/~tb4/rohstofflich.htm>

¹² http://home.arcor.de/abi_2003/fach/Kunststoff.pdf

4. Recycling von Carbonfasern und CFK

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe stellen ein Verbundmaterial aus Kohlenstofffasern und einer Kunststoffmatrix dar. Kohlenstofffasern werden überwiegend aus Polyacrylnitril (PAN) in einem mehrstufigen Prozess hergestellt. In einem ersten Schritt wird das Ausgangsmaterial Polyacrylnitril bei 200°C bis 300°C einer Stabilisierungsbehandlung an Luft unterzogen. In einem anschließenden Prozessschritt erfolgt die Karbonisierung bei 1300 – 1600°C. Die mechanischen Eigenschaften der Fasern sind stark von dieser Behandlungstemperatur abhängig.

Bei ca. 1300°C erreicht die Festigkeit ihr Maximum. Hochfestigkeitsfasern (HT) und Intermediate-Modulus (IM) Fasern werden bei dieser Temperatur hergestellt. Die Steifigkeit der Fasern in Faserrichtung steigt kontinuierlich mit der Behandlungstemperatur. Aus diesem Grund werden Hochmodulfasern (HM) in einem weiteren Prozess (Graphitieren) Temperaturen von 2000 – 3000°C ausgesetzt.

Die Schwierigkeit des Recyclings von Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen besteht sowohl im erneuten Erwärmen von Duromeren (wie z.B. Epoxidharze) wie auch in der möglichst weitgehenden Erhaltung der Faserlänge. Die Gewinnung von Kurzfasern wird bereits praktiziert.¹³

Das Recycling von Carbonfasern und daraus gefertigten CFK-Bauteilen wird im Wesentlichen durch die drei Faktoren Ökologie, Ökonomie und rechtliche Bestimmungen beeinflusst. Ökologisch betrachtet bietet sich durch das Recycling die Möglichkeit den hochwertigen aber sehr energieintensiven Rohstoff Carbonfaser wiederzuverwenden und somit den hohen Herstellungsaufwand zu rechtfertigen. Dies trifft auch auf die Fertigung von CFK-Bauteilen zu, dessen Gesamtenergiebilanz durch den Einsatz von recycelten Carbonfasern verbessert werden kann. Wie bei den meisten Recyclingmethoden kann auch beim Recycling von Carbonfasern eine Ressourcenschonung bei gleichzeitiger Abfallverringerung und damit einer Entlastung der Umwelt erreicht werden.

Der Austausch der teuren Carbonneufasern gegen die günstigeren recycelten Carbonfasern wird als ein wesentlicher Punkt aus ökonomischer Sicht angesehen. Allerdings können nur geringe Mengen an Recyclat einem Produkt zugefügt werden, da die mechanischen Eigenschaften der recycelten Carbonfasern nicht den Eigenschaften der Neufasern entsprechen. Beim Einsatz von Recycling-Carbonfasern wird weiterhin von einer Reduktion der Entsorgungskosten ausgegangen und es besteht die Möglichkeit der Bildung eines neuen Marktes durch den Verkauf von recycelten Carbonfasern.

Das Recycling von Carbonfasern wird weiterhin durch rechtliche Vorgaben beeinflusst. Die Deponierung wird durch das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz sowie die Deponieverordnung und europäische Vorgaben reglementiert und ist vor allem für CFK keine Alternative. Des Weiteren schreiben anwendungsbezogene Regelegungen wie die Altauto-verordnung genaue Recyclingquoten für die eingesetzten Materialien vor. Durch diese gesetzlichen Vorgaben werden alternative Entsorgungswege für Carbonfaserverstärkte Kunststoffe notwendig. Über den Produktentstehungs- und Lebenszyklus betrachtet fallen besonders während der Bauteilherstellung und im Produktbetrieb bis zum Produktende verwertbare Abfälle an. Dabei kann der Abfall in drei Gruppen unterteilt werden. Am Anfang können während der Produktion fehlerhafte Carbonfasern oder textile Halbzeuge entstehen. Diese sind noch nicht mit einer Matrix benetzt und werden deshalb als trockener Abfall bezeichnet.

¹³ bifa Umweltinstitut, Entwicklungsstudie zur Errichtung einer CFK-Recyclinganlage in Bayern

Ebenfalls zum trockenen Abfall gehören nicht genutzte Reste, die beim Zuschnitt der einzelnen Faserlagen entstehen. Als zweite Gruppe entstehen mit Matrix benetzte aber noch nicht ausgehärtete Carbonfaserhalbzeuge. Dies sind fast ausschließlich Prepregs, die entweder fehlerhaft produziert wurden oder wie beim trockenen Abfall beim Zuschnitt der einzelnen Laminatlagen entstehen. Die dritte und größte Gruppe an Abfall sind ausgehärtete CFK. Dabei sind Ausschussbauteile und notwendige Randbesäumung vergleichsweise gering gegenüber nicht mehr einsatzfähigen CFK-Bauteilen aus der Produktanwendung.

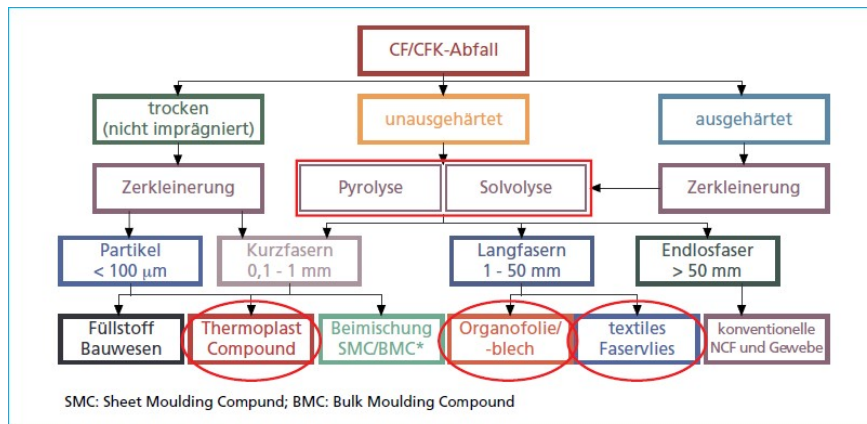


Bild 2: Verwertungswege von Carbonfaser/CFK-Abfall

Die trockenen Carbonfaserreste lassen sich vergleichsweise einfach recyceln. Sie werden gemahlen oder geschnitten als Verstärkungsfasern oder Füllstoffe in Spritzgussgranulaten, Pressmassen sowie in Bauprodukten eingesetzt.¹⁴

Als Recycling-Verfahren kommen **das thermisch-stoffliche Recycling** (katalytische Pyrolyse, Umkehrvergasung) und das **chemische Recycling** (Zersetzung der Matrix mittels chemischer Aufspaltung der Verbindungen, z.B. durch Methanolyse oder Glykolyse mit anschließender Rückgewinnung der Fasern) in Frage. Weiterhin werden bereits das werkstoffliche Recycling (Zerkleinerung, Abtrennung des Mahlgutes und Einsatz als Füllstoff) und die thermische Verwertung (Verbrennung, Pyrolyse, Verwertung im Hochofen) angewendet.

Um ein qualitativ hochwertiges Recyclingprodukt zu erhalten, muss der Schwerpunkt von zukünftigen Verfahren bei dem Erhalt einer möglichst großen Faserlänge der CFK-Materialien liegen, denn diese ist bedeutend für die Qualität des Recyclingproduktes. Je länger die Fasern, desto höher die Qualität der CFK Materialien.

Bei den stofflichen Recyclingverfahren muss zwischen der Verwertung von faserverstärkten Thermoplasten und Duroplasten unterschieden werden. Dabei stellen faserverstärkte Kunststoffe auf Thermoplastbasis ein geringeres Problem dar. Dies ist damit zu begründen, dass thermoplastische Kunststoffe je nach Typ bei einer bestimmten Temperatur schmelzen. Anschließend können diese in Form gebracht und durch Abkühlen verfestigt werden. Im Gegensatz dazu stellt sich das Recycling von duroplastischen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen schwieriger dar. Duroplaste lassen sich durch erneutes Erhitzen nicht lösen, so dass ein Aufschmelzen anders als bei Thermoplasten nicht möglich ist.

¹⁴ Meiners/ Ewersmann: Recycling von Carbonfasern. 2014

Als chemische Verfahren der Rohstoffrückgewinnung kommen die **Teiloxidation, Pyrolyse** und **Solvolyse** in Betracht. Besonders die letzten beiden Verfahren sind derzeit von besonderem Interesse für das Recycling von benetzten Carbonfasern die sowohl unausgehärtet als auch als fertiges CFK-Bauteil vorliegen.

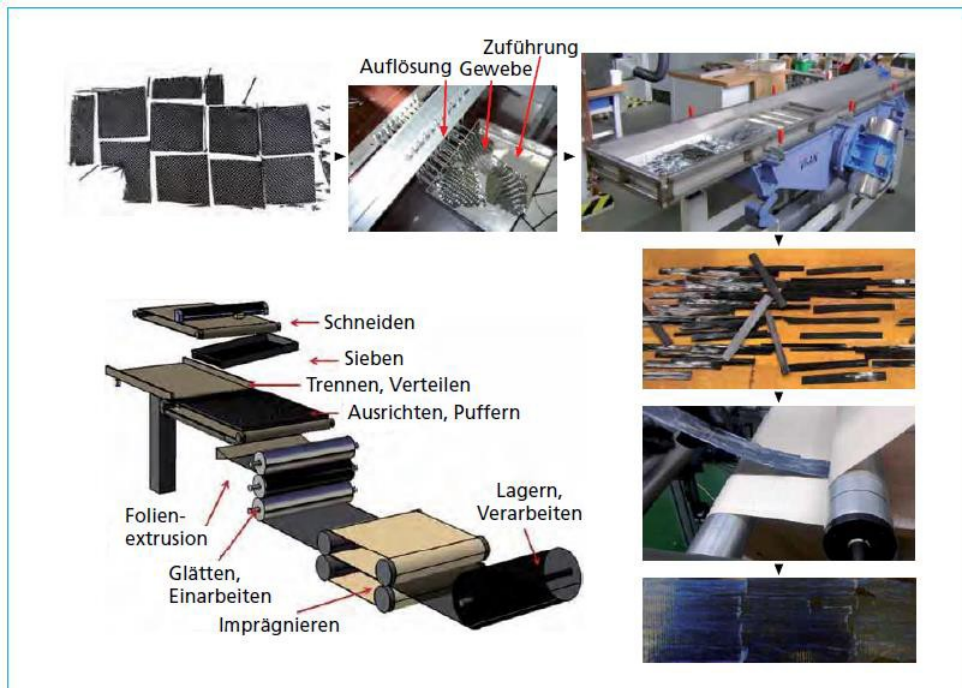
Bei der Pyrolyse nutzt man die deutlich unterschiedlichen Zersetzungstemperaturen von Carbonfasern (3.600 °C) und der sie umgebenden Matrices (i.A. < 600 °C), um eine Trennung auf thermischem Weg durchzuführen. Hierbei ist zu beachten, dass Carbonfasern ab einer Temperatur von 600 °C eine hohe Oxidationsneigung haben, die sich extrem negativ auf ihre mechanischen Eigenschaften auswirkt. Nur unter Inertgasatmosphäre können Carbonfasern ohne deutlichen Gewichts- und Qualitätsverlust höheren Temperaturen widerstehen. Bei allen thermischen Aufbereitungsprozessen wird der Kunststoff zersetzt und nur die Carbonfasern zurück gewonnen.

Bei der Solvolyse werden superkritische Flüssigkeiten (z.B. superkritisches Propanol) zur Trennung von Faser und Matrix eingesetzt. Hierzu bringt man zerkleinerte Faserverbundabfälle bei erhöhtem Druck und Temperatur mit Propanol in einen Reaktor ein. Im superkritischen Zustand ist das Propanol in der Lage die Matrix fast vollständig von der Faser zu lösen. Die im Propanol gelösten Matrixbestandteile können als Rohstoff in der chemischen Industrie weiterverarbeitet werden. Das Lösungsmittel muss hierbei auf die Matrix abgestimmt werden. Im Vergleich zur Pyrolyse hat die Solvolyse ein geringeres Energieniveau, erfordert aber weitere Aufbereitungsschritte (Reinigen, Waschen, Trocknen, Lösungsmittelaufbereitung) und ist nicht auf jedes Matrixsystem anwendbar.

Die aus der Pyrolyse und Solvolyse gewonnenen Carbonfasern sind nach weiterer Zerkleinerung beispielsweise als Verstärkungskomponente von thermoplastischen Polymeren geeignet. Durch die Herstellung eines spritzgießfähigen Compounds mit recycelten Carbonkurzfasern erfolgt die Rückführung in neue Kunststoffprodukte.

Eine Alternative dazu ist die Herstellung von flächigen textilen Halbzeugen aus recycelten Carbonlangfasern. Besonders erfolgversprechend ist hierbei die Herstellung von Vliesen aus recycelten Carbonfasern. Diese Carbonfaservliese weisen zwar keine vergleichbaren mechanischen Eigenschaften im Verbund auf wie neue Wirrfasermatten, trotzdem können sie zur Verbesserung der Oberflächenqualität in gewebeverstärkten CFK-Bauteilen oder für Verkleidungselemente eingesetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit der Anwendung von recycelten Carbonlangfasern ist die **Organofolie**. Dabei werden vor allem aus trockenem Faserverschnitt einzelne Faserabschnitte gerichtet auf eine PET-Folie aufgebracht, anschließend konsolidiert und so zu einem thermoplastischen Halbzeug verarbeitet. Im Prozess werden die Carbonfasern/Gewebereste zunächst durch eine Schnittwalze oder einen herkömmlichen CNC-Cutter auf eine für die Folgeprozesse geeignete Größe zugeschnitten. Kleinere Abschnitte fallen durch ein Sieb und können anderen Anwendungen zugeführt werden. Durch Vibrationstechnik werden die trockenen Gewebe- und Gelegezuschnitte zu einzelnen Rovings aufgelöst. Die Fasern werden durch die Vibration einheitlich ausgerichtet und einer extrudierten, noch nicht erstarrten Polymerfolie zugeführt. Die Folie wird unmittelbar nach der Düse mit den einheitlich ausgerichteten Langfasern belegt und durchläuft zur vollständigen Imprägnierung z.B. eine Doppelbandpresse oder einen Kalander. Die so entstandene Organofolie kann beispielsweise im Thermoformprozess zu neuen Bauteilstrukturen verarbeitet werden. So konnte als Technologiedemonstrator ein PKW-Kotflügel realisiert werden.



Recyclingkonzept: Organofolie aus Gewebeverschnitt

Des Weiteren können ausgehärtete Prepregs, Ausschussteile und Post-Consumer-Abfälle einem reinen Partikelrecycling unterzogen werden. Hierbei wird der Verbund zerkleinert und neuen duromeren Faserverbundmaterialien wie Sheet Moulding Compounds (SMC) oder Bulk Moulding Compounds (BMC) als Füllstoff aus Carbonfaser und Matrix zugesetzt. Gleiches ist auch für Baustoffe beispielsweise Beton vorstellbar. Das Partikelrecycling stellt die einfachste Methode zum Recyceln von ausgehärteten Verbunden dar und ist für große Mengen geeignet. Jedoch wird es dem hochwertigen Ausgangsmaterial Carbonfaser durch das starke Downcycling nicht gerecht und sollte deshalb einer genauen wirtschaftlichen Betrachtung vor der Anwendung unterzogen werden.

Für den derzeit noch geringen Anteil an thermoplastischen CFK besteht die Möglichkeit das Material zu granulieren, erneut einzuschmelzen und zu einem neuen Bauteil zu verarbeiten. Es muss jedoch beachtet werden, dass durch die hohe Scherbeanspruchung im Extrusions- und Spritzgussprozess die Fasern stark eingekürzt werden und dass viele Thermoplaste nicht miteinander mischbar sind. Eine sortenreine Trennung nach Matrixmaterialien ist hier notwendig. Hinzu kommt, dass Kunststoffe altern und sich hierdurch ihre Eigenschaften (z.B. Schlagzähigkeit) verschlechtern können.¹⁵

FAZIT

¹⁵ Meiners, Ewersmann: Recycling von Carbonfasern. 2014

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) sollen zukünftig aufgrund ihres enormen Leichtbaupotenzials in vielfältigsten Bereichen und in deutlich stärkerem Maße als bisher zum Einsatz kommen. In vielen Industriezweigen und Bereichen unseres Lebens werden deshalb immer größere Mengen an CFK-Werkstoffen anfallen.¹⁶

An den folgenden Fragestellungen und Lösungsansätzen wird die Diskussion um Chancen und Grenzen von Faserverbundwerkstoffen ersichtlich.

- **Kann der Einsatz von Faserverstärkten Kunststoffen „nachhaltig“ sein?** Verschiedene Beispiele und Studien belegen, dass der Einsatz von Verstärkten Kunststoffen, z. B. im Hinblick auf die eingesetzte Menge CO₂, im Gegensatz zur Verwendung anderer Materialien deutlich effektiver sein kann. Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus eines Produktes so weist beispielsweise die Herstellung, Verwendung und Entsorgung einer Fußgängerbrücke aus GFK (Glasfaserverstärktem Kunststoff) einen deutlich geringeren CO₂-Verbrauch auf als eine Brücke aus Beton. Ein weiteres Beispiel sind Fahrzeuge und Flugzeuge, die durch die Verwendung von FVK-Bauteilen leichter werden, was deren Kraftstoffverbrauch verringert oder deren Reichweite mit derselben Kraftstoffmenge erhöht. Die gute Korrosionsbeständigkeit von FVK führt dazu, dass deren Einsatz beispielsweise im Offshore-Bereich deutlich weniger kostenintensiv ist als der von Stahl, da aufwändige Instandhaltungsmaßnahmen geringer werden.
- **Stimmt es, dass FVK nicht verwertet werden können?** Die großen Vorteile im Hinblick auf die Langlebigkeit von FVK können in der Tat auch zu einer Herausforderung werden. Speziell die sogenannten Duroplaste bilden einen extrem harten Verbund, der nur noch sehr schwer aufgelöst werden kann. Hierzu wird hohe mechanische Kraft benötigt. Es gibt derzeit ein Verfahren, mit dessen Hilfe ausgediente GFK-Abfälle zu 100 Prozent verwertet werden können. Dieses System ist als Label „CompoCycle“ (www.compocycle.com) am Markt etabliert.
- **Was muss noch getan werden?** Faserverstärkte Kunststoffe sind ein „junger“ Werkstoff. Gemessen an anderen Materialien wie z. B. Stahl oder Holz befindet sich das Material in der Anfangsphase der Verwendung und Entwicklung. Es gibt noch viel zu tun. Es besteht die Überzeugung, dass FVK, auch unter der Beachtung gewaltiger vor uns liegender Anforderungen im ökologischen Bereich, ein entscheidender Werkstoff des 21. Jahrhunderts ist, ohne den zukünftig kaum eine Branche auskommen wird. Wir sind von den Vorteilen unseres Werkstoffes, auch in Bezug auf die optimale Nutzung der uns zur Verfügung stehenden endlichen Ressourcen, in vielen Bereichen überzeugt. Leider ist der Bekanntheitsgrad der Werkstoffe an vielen Stellen noch gering. Hier besteht eine der wichtigsten zukünftigen Aufgaben innerhalb der Branche. Es gilt, unermüdlich die Vorteile aufzuzeigen, ohne jedoch die problematischen Seiten zu vernachlässigen.
- **Sind FVK „besser“ als andere Materialien?** Generell lässt sich festhalten, dass FVK in einigen Fällen Vorteile gegenüber anderen Werkstoffen, wie z. B. Stahl oder Aluminium haben, viele Unternehmen diese Vorteile aber noch nicht in vollem Umfang nützen. Oftmals fehlt das notwendige Wissen über den Werkstoff, oder die entsprechenden Maschinen in den Unternehmen sind auf metallische Werkstoffe ausgelegt. Auch wenn FVK nicht das generell „bessere“ Material sind, so würde es sich doch für viele Unternehmen lohnen, sich auch in Bezug auf Produktions- und Herstellungskosten intensiver mit dem Thema auseinanderzusetzen. Es bestehen

¹⁶ Vgl. z.B. <http://carbon-composites.eu/de/projekte/mai-carbon-projekte/effizienz-und-nachhaltigkeit/mai-recycling/?division=3472>

enorme Möglichkeiten auch in der Kombination verschiedener Werkstoffe. Deshalb wäre es wünschenswert, wegzukommen von der rein werkstoffseitigen Betrachtung mit der Frage „Was kann der Werkstoff?“ hin zu einer produktbezogenen Betrachtung. Die Frage lautet hier: „Was soll ein Produkt können beziehungsweise welche Charakteristika soll es aufweisen?“ Anschließend ist die Frage zu stellen, welcher Werkstoff oder welche Werkstoff-Kombination die gestellten Anforderungen am besten erfüllt.¹⁷

Bei Bauteilen aus CFK handelt es sich um hochwertige, langlebige Komponenten mit einer Lebenserwartung von mindestens 10 bis 30 Jahren. Da es erst in dieser Zeitspanne zu einem verstärkten Einsatz von CFK in Bauteilen kommen wird, ist in den nächsten Jahren mit einer stark steigenden Menge an zu recycelnden Carbonfasern zu rechnen, die die Kapazität der bestehenden Anlagen überschreitet. Aufgrund der in den nächsten Jahren zu erwartenden CFK-Abfallmengen, den gesetzlichen Regelung zur Deponierung und den hohen Herstellungskosten ist das Recycling von CFK sinnvoll und nötig. Bei den bestehenden Verfahren scheinen die Solvolyse und die Pyrolyse die erfolgversprechendsten Verfahren zu sein. Es ist aber weiter von einem Downcycling der wiederaufbereiteten Carbonfasern auszugehen. Die Hauptanwendungen werden vor allem bei thermoplastischen Halbzeugen wie z. B. Organofolien gesehen. Damit ein erfolgreicher Wiedereinsatz in CFK-Bauteilen wirtschaftlich möglich ist, müssen die Recyclingprozesse optimiert werden und Anwendungen mit einem Alleinstellungsmerkmal für recycelte Carbonfasern gefunden werden.¹⁸

Weitere Quellen:

bifa Umweltinstitut, Entwicklungsstudie zur Errichtung einer CFK-Recyclinganlage in Bayern
Kunststoffe - Werkstoffe unserer Zeit, Arbeitsgemeinschaft Deutsche Kunststoffindustrie
<http://www.kunststoffe.fcio.at/publikationen/>
<http://www.dkr.de>
<http://www.chemie-am-auto.de/begleitmaterial/index.html>

¹⁷ http://www.avk-tv.de/files/20110701_nachhaltigkeit_fvk_facts_figures.pdf

¹⁸ Quelle: Recycling von Carbonfasern, Meiners, Ewersmann 2014