

Anregung

Die Stadt Wuppertal setzt sich für die Schaffung einer Pilotanlage zum Kryo-Recycling nach Prof. Dr. Rosin ein, um Kunststoffe sortenrein und in Originalqualität wiederzuverwerten. Dies könnte beispielsweise als Projekt im *Circular Valley* stattfinden, als Träger könnte beispielsweise die AWG als Stadttochter fungieren.

Begrün(d)ung

Das Circular Valley wird in den Medien gerne als Vorzeigeprojekt in Wuppertal hervorgehoben. Im Wuppertal Alltag ist davon aber nicht viel angekommen – weiterhin werden jährlich über 400.000 Tonnen „Müll“ verbrannt, davon ein Großteil der Plastikabfälle.

Nach Ansicht der Europäische Umweltagentur (EUA) verursacht jede Tonne verbrannter Kunststoff zwei Tonnen CO₂. Dabei wird nicht einmal ein Drittel der für die Produktion aus Erdöl benötigte Energie wieder als „thermische Energie“ frei, die dann für Abgasnachbehandlung und Stromerzeugung benutzt wird oder einfach zum Schornstein entweicht.

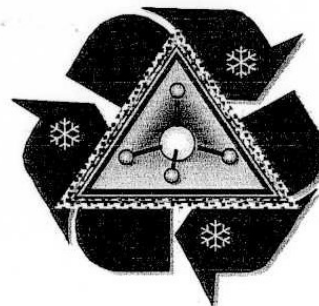
Nach Angaben des Wuppertal-Instituts wird von all dem schönen getrennten Plastik über die „Gelbe Tonne“ lediglich sieben Prozent tatsächlich wiederverwertet. Der Rest landet in Müllverbrennungsanlagen oder auch als „Wertstoff“ nach Afrika und Asien, und verpestet dort als wilde Müllhalde die Umwelt.

Das Recyclingproblem von Schredderanlagen, die Kunststoffteile in grobe Schnitzel zerlegen und dabei leider auch die langen Polymerketten, gibt es beim Kryo-Recycling nicht. Das Material lässt sich sorten- und farbrein bei etwa -161°C sortieren und bleibt in den physikalischen Eigenschaften mit dem Ausgangsmaterial identisch.

Beim Kryorecyclingverfahren nach Harry Rosin wird ein Gemisch aus Propan, Ethan und Methan eingesetzt, die Betriebsmittelkosten sinken im Vergleich zum alten Cryogen-Recycling mit flüssigem Stickstoff auf ca. 1/10.

Neben einem vollständigen Recycling vermindert dieses nicht nur den Energieeinsatz bei der Produktion neuer Kunststoffe aus Erdöl. Vielmehr vermindert es die Abhängigkeit Deutschlands von der sonst notwendigen Einfuhr von Erdöl.

Auf den nachfolgenden Seiten wird das Prinzip des Kryorecyclings nach Harry Rosin näher erläutert.





Kryo-Recycling von Kunststoffen

Ein bedeutendes Verfahren der Kreislaufwirtschaft



Bildquelle: Wikimedia Commons



Ein Informationsblatt der
Bürgerbewegung für Kryo-Recycling,
Kreislaufwirtschaft und Klimaschutz e.V. (Herausgeber und Kontakt)
Schmalhorststraße 1c
45899 Gelsenkirchen
Telefon: 0209 - 88 33 63 30

Fax: 0209-88 33 63 39

Email: info@total-recycling.org

Internet: www.total-recycling.org

Stand: Oktober 2012

Abstrakt

Derzeit werden in Deutschland ca. 63 Prozent der Kunststoffabfälle verbrannt oder auf Deponien beseitigt. Von diesen so aus dem Weg geschafften Kunststoffabfällen wird bestenfalls ihr Brennwert ausgeschöpft, die weitere Nutzung des Rohmaterials wird damit zunichte gemacht und in großen Mengen giftige Abgase und wertlose Schlacke erzeugt. Dabei ist die Möglichkeit, Kunststoffe wieder aufzuwerten und in einen Rohstoffkreislauf einzubringen, technisch erforscht und wirtschaftlich nutzbar - im Rahmen des Kryo-Recycling-Verfahrens. Diese Broschüre wurde von der Bürgerbewegung für Kryo-Recycling, Kreislaufwirtschaft und Klimaschutz e.V. erstellt, um einen konkreten Einblick in dieses ressourcenschonende Kunststoff-Recycling-Verfahren zu geben und die Notwendigkeit des Umstiegs auf kreislaufwirtschaftliche Rohstoffverwertung deutlich zu machen.

Inhaltsverzeichnis

Abstrakt.....	2
Selbstverständnis des Vereins.....	3
Liebe Leserin, lieber Leser,.....	3
Kunststoffabfälle.....	4
Begriffe aus der Entsorgungspolitik.....	4
...und was sie tatsächlich bedeuten.....	5
Energiebilanz.....	6
Recyclingfähige Kunststoffe.....	7
Prinzipien des werkstofflichen Recyclings.....	7
Versprödungseffekt.....	8
Die Notwendigkeit effizienter Kühltechnik.....	8
Kühltechnik des Kryo-Recycling-Verfahrens.....	9
Direkte und indirekte Kühlung des Kryo-Recycling-Verfahrens.....	10
Tiefstkälte-Kaskaden-Anlage.....	11
Verfahrenstechnik im Kältetunnel.....	11
Vorzerkleinerung des Kunststoffabfalls.....	12
Grob- und Feinmahlung im Kältetunnel.....	12
Selektion im Kältetunnel.....	13
Klassieren des Kunststoffgemisches.....	14
Vorteile des Kryo-Recycling-Verfahrens.....	15
Grenzen des Kryo-Recycling-Verfahrens.....	16
Bereits existierende Bestandteile kryogener Recycling-Anlagen.....	17
Wirtschaftliche Aspekte.....	17
Schlusswort.....	18
Quellenverzeichnis.....	19
Danksagung.....	18

Selbstverständnis des Vereins

Unser Verein setzt sich für das Ziel einer totalen Kreislaufwirtschaft ein.

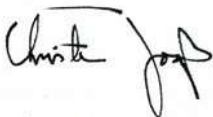
Wie in der Natur, müssen auch in der menschlichen Produktion und Konsumtion die stofflichen Kreisläufe geschlossen werden. Durch eine umfassende Kreislaufwirtschaft können der Raubbau an der Natur, die Umwelt- und Klimakrise überwunden werden. In der vorwiegend auf Gewinnmaximierung ausgerichteten Produktion dagegen, werden bewusste Verschwendung und Verschleiß gefördert, zehntausende künstliche und giftige Stoffe hergestellt und riesige Müllberge geschaffen. Statt Stoffe zu recyceln, werden große Mengen verbrannt. Kreislaufwirtschaft bedeutet auch zerstörerische Entwicklungen wie Massentierhaltung, Fracking, Geoengineering oder CO₂-Speicherung entschieden zu bekämpfen. Um Rohstoffe zu erhalten ist heute die Entwicklung und Förderung einer Vielzahl von Recycling-Verfahren notwendig.

Unser Verein setzt sich besonders ein für das Kryo-Recycling für Kunststoffe und Altelektronik sowie ein mehrstufiges Methanisierungsverfahren für Bioabfälle zur Gewinnung von Energie und hochwertigem Kompost.

Die Natur selbst gibt die Anleitung für die Entwicklung von Stoffen die 100 Prozent recycelt werden können. Kreislaufwirtschaft total bedeutet auch, die Energiegewinnung vollständig auf der Basis regenerativer Energien zu organisieren.

Liebe Leserin, lieber Leser,

Als Getränkeflasche, Kleidung, Kinderspielzeug, Verpackung, Möbel, Fenster, im PKW - Plastikprodukte begegnen uns mittlerweile überall. In Elektronikprodukten treten Kunststoffe neben Metallen und Keramiken in äußerst komplexen Zusammensetzungen auf. Die Recyclingquoten bei Kunststoffen sind jedoch nach wie vor äußerst gering, ca. 20 Prozent in Deutschland (inklusive Down-Cycling) und weniger als 1 Prozent im weltweiten Durchschnitt. Weltweit landen Kunststoffe auf Deponien und im Meer, wo es in bestimmten Gebieten mittlerweile mehr Plastikpartikel gibt als Plankton, wie u.a. in dem Film „Plastik Planet“ dargestellt wird. Die zunehmende Plastikverseuchung der Erde ist Teil einer drohenden katastrophalen Zerstörung der natürlichen Umwelt. Ein wichtiges Verfahren für eine umfassende Kreislaufwirtschaft stellt das von Prof. H. Rosin und Mitarbeitern entwickelte Kryo-Recycling-Verfahren dar. Mittels einer hocheffizienten Kältetechnik können aus Kunststoffen und Kompositen sortenreine und hochwertige Rohstoffe erzeugt. Das Verfahren ist im Labormaßstab erprobt und bei einigen industriellen Recycling-Firmen in seinen Grundzügen bereits im Einsatz. Diese Broschüre möchte einen Beitrag leisten, den Stand des Kryo-Recycling Verfahrens breiter bekannt zu machen. Sie unterstreicht die seit Jahren von unserem Verein erhobene Forderung nach Pilotanlagen und einer Wende zur Kreislaufwirtschaft-total.



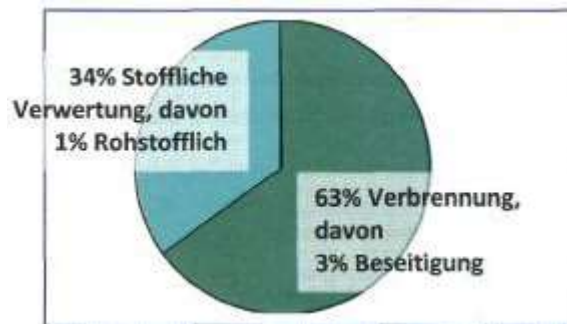
Göttingen, im Oktober 2012

Prof. Dr. Christian Jooß

Im Namen des Vorstands der Bürgerbewegung für Kryo-Recycling, Kreislaufwirtschaft und Klimaschutz e.V.

Kunststoffabfälle

Laut Statistischem Bundesamt lag die Gesamtabfallmenge im Jahr 2009 bei 359,4 Mio.t. Die Menge an Kunststoffabfällen betrug im selben Jahr 4,93 Mio. t, was 1,37 Gewichts- Prozent des Gesamtabfallaufkommens entspricht.



Entsorgung von Kunststoffabfällen 2009^A

Dementsprechend wurden im Jahr 2009 mindestens 2,7 Mio. t Kunststoffe in Müllverbrennungsanlagen (Müllverbrennungsanlage) verbrannt. Dabei auftretende Probleme sind:

- Dioxine, Feinstäube und andere persistente Kanzerogene^B gelangen in die Nahrungskette und damit in den menschlichen Körper.
- Nur 5 Prozent (!) des Gesamtenergiegehalts des verbrannten Kunststoffabfalls werden als Strom wiedergewonnen, demnach sind Kunststoffe kein „schnittfestes Erdöl“.
- Zur Verbrennung von Abfall von minderwertiger Heizleistung wird Stützfeuerung mit 30 l Öl pro Tonne Abfall betrieben. Kunststoffe sind zu wertvoll, um sie zur Stützfeuerung zu nutzen (siehe Energieeffizienz-Vergleich Seite 6 bzw. Endnote C).

Begriffe aus der Entsorgungspolitik...

In der EU-Rahmenrichtlinie (98/2008/EG) werden die für die Müllwirtschaft relevanten Begriffe aus Sicht der Politik definiert:

Verwertung

Jedes Verfahren, das Abfälle einem sinnvollen Zweck zuführt.

Beseitigung

Jedes Verfahren, das keine Verwertung ist.

Recycling

Jedes Verfahren, das Abfälle zweckgebunden aufbereitet und nicht energetisch verwertet.

Der Bereich der Verwertung lässt sich untergliedern in:

Energetische Verwertung

Jedes Verfahren, das Abfälle zur Energieerzeugung nutzt.

Stoffliche Verwertung (im allgemeinen Sprachgebrauch „Recycling“)

- **Rohstofflich:** Die chemische Struktur des Ausgangsstoffes wird verändert.
- **Werkstofflich:** Die chemische Struktur des Ausgangsstoffes bleibt erhalten.

Der Terminus „**Energetische Verwertung**“ ist ein irreführender Green-Washing-Begriff: Die bei der Verbrennung freigesetzte Energie verpufft zu großen Teilen ungenutzt, zudem werden bei der Verbrennung Giftstoffe erzeugt. Es werden Rohstoffe vernichtet, die für die Weiterverarbeitung zu hochwertigen Materialien sehr gut geeignet sind.

Auch der Begriff „Beseitigung“ ist irreführend, da Stoffe zwar umgewandelt, aber nicht vernichtet werden können. Es entspricht eher einem „zur Seite Schieben“ der Abfälle.

...und was sie tatsächlich bedeuten

Beseitigung

Abgabe der Abfälle in die Umwelt, wie z.B. Flüsse, oder in Endlager, wie z.B. Mülldeponien, von denen es im Jahr 2008 deutschlandweit 1600 gab. Auch der illegale Export von z.B. Elektroschrott nach Asien und Afrika fällt unter diesen Begriff.

Energetische Verwertung

Verbrennung der Abfälle unter Zuheizen durch Öl o.a., z.B. in Müllverbrennungsanlagen. Der Import von Abfällen und Giftstoffen zur Verbrennung hat erheblich zugenommen, dadurch wächst die gesundheitliche Gefährdung der Bevölkerung.

Rohstoffliche Verwertung

Chemische Recycling-Verfahren, z.B. Gewinnung von Synthesegas oder Methanol aus Kunststoffabfällen.

Werkstoffliche Verwertung

Mechanische Recycling-Verfahren, wie das Schreddern, Mahlen oder auch Schmelzen von sortierten Abfällen. Man unterscheidet zwischen vollwertigen Verfahren wie dem Kryo-Recycling-Verfahren, bei dem die Materialqualität erhalten bleibt, und dem Down-Cycling mit einhergehender Verminderung der Materialqualität, wie z.B. dem Recycling von Altpapier zu Toilettenpapier.

Das **Kryo-Recycling-Verfahren** ermöglicht die sortenreine Trennung von Kompositwerkstoffen und stellt damit eine werkstoffliche Verwertungsmethode dar, die die Qualität des Ausgangsproduktes erhält.

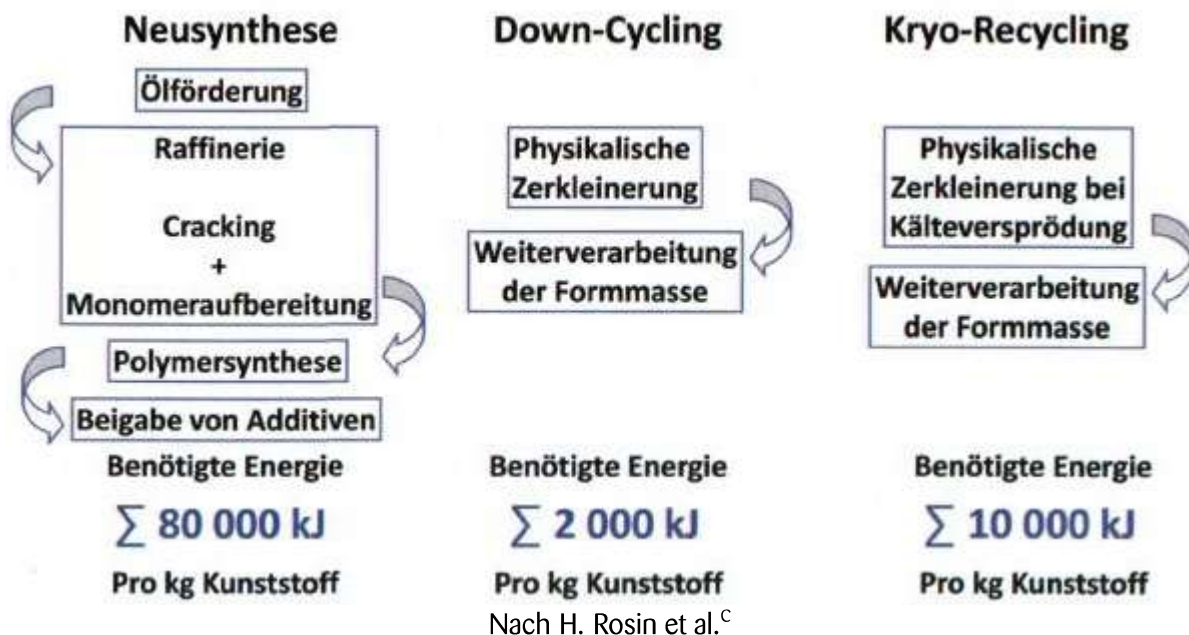
Statt der Verbrennung in Müllverbrennungsanlage sollten Kunststoffe anhand des **Kryo-Recycling-Verfahrens** verwertet werden, um Ressourcen zu schonen und eine umfassende Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen.

Energiebilanz

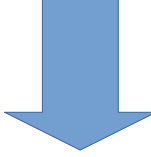
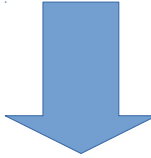
Ein häufig gebrachtes Argument gegen die Weiterentwicklung der werkstofflichen Verwertung ist, dass die Recyclingkosten im Gegensatz zur Neusynthese zu hoch seien. Entgegen dieser Behauptung ist das Recycling wesentlich energieeffizienter als die Neusynthese aus Rohöl, wie man nebenstehendem Schema entnehmen kann, das typische Werte für die Thermoplasten PET und PC zeigt. Das Down-Cycling bietet die Möglichkeit, bereits einmal verwendete Kunststoffe sehr energiesparend aufzubereiten, um sie unter Bedingungen einzusetzen, die keine hohe Anforderung an das Material stellen. Ein Beispiel ist die Wiederaufbereitung von Verpackungsmaterialien, die im ersten Nutzungszyklus lebensmittelecht sein mussten, zu Kunststoffteilen, die nur einen geringen Anspruch an Reinheit oder Qualität erfüllen müssen, wie die Sitzflächen von Parkbänken. Jedes weitere Down-Cycling über den ersten Nutzungszyklus hinaus liefert Kunststoffmaterial mit immer undefinierteren Eigenschaften und Inhaltsstoffen, was die Einsetzbarkeit erheblich einschränkt.

Das Kryo-Recycling-Verfahren hingegen ermöglicht die sortenreine und qualitätsbezogene Trennung von Kunststoffen. Das Recyclat weist auch nach mehreren Nutzungszyklen eine hohe Materialqualität auf, da durch die vorherige Nutzung verändertes Material von unbeschädigtem Material getrennt wird.

Das **Kryo-Recycling-Verfahren** ist im Vergleich zur Neusynthese eine energieeffiziente Kunststoff-Recycling-Methode, die im Gegensatz zu anderen werkstofflichen Recyclingmethoden die Qualität der recycelten Kunststoffe erhält.



Recyclingfähige Kunststoffe

Thermoplaste	Elastomere	Duromere
• Zähelastisch • Unzerbrechlich • Schmelzfähig • Schweißbar • Prinzipiell 8-20 mal umschmelzbar • 75-80 Prozent aller Kunststoffe 	• Formfest • Elastisch verformbar • 40 Prozent Naturgummi und 60 Prozent synthetisches Gummi • 70 Prozent der Elastomere genutzt für Altreifen • 10 Prozent aller Kunststoffe 	• Spröde • Hart • Brüchig • Z. B. Plexiglas, Epoxydharz, Glas-faser-verbund-werkstoffe, Altelektronik, Komposite • 10-15 Prozent aller Kunststoffe 
Kryo-Recycling-Verfahren zur werkstofflichen Verwertung		

Bei Thermoplasten und Elastomeren werden die Erwartungen an die Qualität des Recyclats bei werkstofflicher Verwertung durch das Kryo-Recycling-Verfahren erfüllt, diese entsprechen 85-90 Prozent aller Kunststoffe.

Da Duromere häufig in Materialkompositen wie bspw. Glasfaser-Verbundstoffen und Elektronikplatinen auftreten, bestehen hier schwierigere Recyclingbedingungen. In Duoplasten selbst liegt zudem eine wesentlich stärkere Vernetzung der Polymerketten vor als in Thermoplasten und Elastomeren, so dass die gewünschten reaktiven Oberflächen des Recyclats schwieriger zu erhalten sind.

Durch die komplexere Verbundstruktur mit zum Teil giftigen Materialien ist die werkstoffliche Verwertung schwer realisierbar, die Trennung der einzelnen Materialien hingegen lässt sich gut umsetzen.

Durch das **Kryo-Recycling-Verfahren** lassen sich Thermoplasten und Elastomere werkstofflich verwerten. Es ist noch unklar, inwieweit dies auch bei Duomeren möglich ist. Auf diesem Gebiet bedarf es weiterer Forschung. Da Duomere, die einen geringen Teil der angewendeten Kunststoffe ausmachen, häufig in komplexen Verbundstoffen Anwendung finden, eignet sich das Kryo-Recycling-Verfahren zum Trennen der verwendeten Materialklassen.

Prinzipien des werkstofflichen Recyclings

Durchschnittlich bestehen auch nach längerem Gebrauch 60-80 Prozent eines Kunststoffobjekts aus völlig intakter Grundmasse, die sich lohnend recyceln lässt.

Wichtige Voraussetzungen für den Erfolg des werkstofflichen Recyclings sind:

- Die Kunststoffmasse inklusive der Additive ist zur Weiterverarbeitung geeignet.

- Die Zerkleinerung selbst schädigt das Material nicht.
- Verschiedene Materialien können voneinander getrennt werden.
- Das Mahlgut kann entsprechend seiner Qualität sortiert und getrennt werden.
- Der Mahlgrad, also die Korngröße des Mahlguts, kann angepasst werden.



Partikel nach ungekühltem (links), gekühltem Mahlen (rechts)^D

Versprödungseffekt

Bei tiefen Temperaturen sorgen zwei unterschiedliche Effekte dafür, dass Kunststoffe fein und schädigungsarm zerkleinert werden können:

- Der Duktile-Spröde-Übergang unterhalb einer kritischen, materialspezifischen Temperatur
- Der Unterschied der stoffspezifischen Kälteschrumpfungsgrade bei Materialien im Verbund

Wird ein normalerweise eher weiches, also duktileres Material stark genug abgekühlt, wird es spröde und brüchig. Dieses Verhalten kann vorteilhaft zur Zerkleinerung von Kunststoffen genutzt werden, da kaum plastische Verformung, also Schädigung am Material auftritt, ehe es zum Bruch kommt.

Materialien ziehen sich bei Abkühlung zusammen, wie stark diese Verformung eintritt, ist von Kunststoff zu Kunststoff verschieden. Durch unterschiedlich starke Verformung treten erhebliche mechanische Spannungen auf, vor allem dort, wo verschiedene Materialien miteinander verbunden sind. Beim Mahlvorgang kommt es am Materialverbund bevorzugt zum Bruch, was besonders bei der Trennung von Kompositwerkstoffen, also miteinander kombinierten Materialien unterschiedlicher Art, genutzt werden kann.

Kunststoffe können bei Raumtemperatur nur grob zerkleinert werden, da sonst starke Schädigungen am Material auftreten. Um Schädigung zu vermeiden und dennoch feines Mahlgut zu erhalten, werden Kühlverfahren für die materialschonende Zerkleinerung eingesetzt.

Die Notwendigkeit effizienter Kühltechnik

Der zur materialschonenden Zerkleinerung genutzte Versprödungseffekt tritt je nach Kunststoff im Bereich von -40°C bis -150°C auf. Auf so tiefe Temperaturen herunterzukühlen erfordert einen hohen Energieaufwand, der gerade bei den herkömmlich genutzten Methoden für hohe Betriebskosten sorgt.

Flüssiger Stickstoff N₂

$$\Delta H_v = 2,79 \text{ kJ/mol}^*)$$

- Herkömmliches Kühlverfahren.
- Kostenintensiv (ca. 0,10 € pro Liter).
- Hoher Verbrauch von 1-3L N₂ pro kg Kunststoff.
- Flüssiger Stickstoff ist nicht wiederverwendbar, da er beim Kühlprozess in die Atmosphäre verdampft.

*) Die Verdampfungsenthalpie ΔH_v ist die freigesetzte Energie pro Stoffmenge bei der Verdampfung.

Übliche Alternativen (FCKW/FKW)

- Ammoniak und natürliche Kohlenwasserstoffe.
- Zur Kühlung auf weniger als -40°C ist eine teure Kaskadenschaltung nötig.
- Die Nutzung dieser Kühlmittel setzt Treibhausgase frei, die die Ozonschicht zerstören.



Durch flüssigen Stickstoff versprödete Rose

Im Folgenden wird unterschieden zwischen den herkömmlichen kryogenen Recycling-Verfahren und dem energieeffizienten Kryo-Recycling-Verfahren mit integrierter Einkreis-Kühltechnik.

Kühltechnik des Kryo-Recycling-Verfahrens

In handelsüblichen Kühlschränken wird ein einfacher Kompressionskreislauf verwendet. Zum Einsatz kommen als umweltfreundliche Kühlmittel Isobutan oder Propan. Leider sind als FCKW-Ersatzstoffe immer noch FKW im Einsatz, z. B. das giftige R134a. Um zu tieferen Temperaturen vorzustoßen sind zwei oder dreistufige Verfahren notwendig. Die von Rosin vorgeschlagene Kohlenwasserstoffmischung aus Propan, Ethan und Methan können in einem Kühlkreislauf zusammengeführt werden und dabei mit hoher Effizienz sehr tiefe Temperaturen erreichen.

Neuartige Einkreis-Kaskadentechnik

- Die hohen Werte der Verdampfungsenthalpie führen zu einem hohen Kühlungspotential:

Propan $\Delta H_v = 18,79 \text{ kJ/mol}$

Ethan $\Delta H_v = 10 \text{ kJ/mol}$

Methan $\Delta H_v = 8,19 \text{ kJ/mol}$

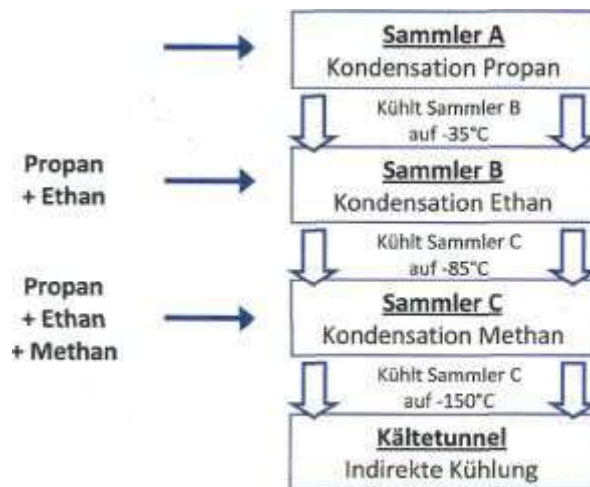
- Die Wechselwirkung zwischen den Molekülen der drei Kühlmittel Propan, Ethan und Methan erhöht die Effizienz um 55 Prozent ^E gegenüber einem Drei-Kreis-System, bei dem die Kühlmittel nicht miteinander in Kontakt kommen.
- Es besteht ein geschlossener Kühlkreislauf, der tatsächliche Verbrauch an Kühlmittel ist minimal.

- Es ist möglich auf bis zu -150°C herunterzukühlen.

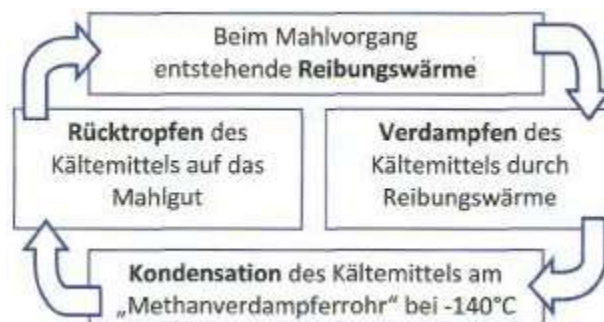
Das beim **Kryo-Recycling-Verfahren** angewendete geschlossene Einkreis-System, bei dem Propan, Ethan und Methan als „Dortmunder Mischung“ zur direkten und indirekten Kühlung des Mahlguts verwendeten werden, ist im Vergleich zu herkömmlichen Kältemitteln energieeffizient und ressourcenschonend. Es fallen nur 10 Prozent der bei Stickstoffkühlung auftretenden Betriebskosten an.

Direkte und indirekte Kühlung des Kryo-Recycling-Verfahrens

Indirekte Kühlung Propan



Direkte Kühlung „Heat Pipe“



Das geschlossene Einkreis-System lässt sich sowohl zur indirekten als auch zu direkten Kühlung des Mahlguts effizient nutzen. Da das Kohlenwasserstoffgemisch aus Propan, Ethan und Methan rückstandslos ausgasst, wird das Mahlgut auch bei der direkten Kühlung nicht verunreinigt.

Die sukzessive Zerkleinerung läuft in tiefkalter, sauerstoffarmer Atmosphäre (Stickstoff oder Kohlendioxid) ab und unterbindet somit unerwünschte Nebenreaktionen an der Kunststoffoberfläche. Auch die Sortierung kann je nach Klassierungsmethode unter kalter, wasserfreier Inertgas-Atmosphäre vollzogen werden.

Vorzerkleinerung des Kunststoffabfalls

Um Kunststoffabfälle zur Verarbeitung im Kältetunnel vorzubereiten, werden sie vorzerkleinert. Dies erleichtert die Handhabung der Kunststoffteile und ermöglicht ein kompakteres Befüllen der zur Grob- und Feinmahlung verwendeten Mühlen.

Zur Vorzerkleinerung gibt es eine Reihe von Verfahren, wie Häckseln, Schreddern oder auch Pressen. Um ein konkretes Beispiel zu geben, wird im Folgenden das Prinzip der Querstromzerspannung erklärt.

Querstromzerspaner

Ein Querstromzerspaner besteht aus einer Trommel, die die Kunststoffteile aufnimmt und in der ein mit Ketten versehener Rotationskörper installiert ist.



Mit Ketten versehener Rotationskörper^G

Ähnlich wie bei einem Kettenkarussell fächern die Ketten bei Rotation auf und treffen auf die Kunststoffteile. Die Zerkleinerung findet durch Zusammenstöße zwischen Teilen des Mahlguts oder mit den Trommelwänden statt, so dass der Verschleiß der Mühle gering gehalten wird.



Materialströmung im Zerspaner^G

Grob- und Feinmahlung im Kältetunnel

Die Grob- und Feinmahlung im Kältetunnel erfolgt schrittweise im Kältetunnel. Es kommen grundsätzlich verschiedene Mühlentypen in Frage, wie z. B. die Schlagmühle, Rotormühle, Walzenmühle, Prallmühle oder auch die Asimamühle. Entscheidend für die resultierende Korngröße des Mahlguts ist aber nicht nur der Mühlentyp, sondern auch die Anpassung der Mahlparameter, wie Mahlfrequenz, Beschaffenheit der Mahlkörper oder Mahldauer.

Als Beispiel wird im Folgenden das Funktionsprinzip der Schlag- bzw. Hammermühle und der Walzenmühle vorgestellt.

Schlag- bzw. Hammermühle



Mahlbehälter einer Schlagmühle mit Mahlstäben^G

Als Mahlkörper dienen Stäbe, die Abrieb- und Bruchfest sind. In einem Mahlbehälter zerkleinern sie die Kunststoffabfälle, indem der Mahlbehälter gerüttelt wird. Die Zerkleinerung findet vornehmlich durch Stöße statt, weniger durch Reibung.

Walzenmühle



Walzenmühle im Industriemaßstab^H

Ein weiterer Walzentyp zur Zerkleinerung von tiefkalten Kunststoffen ist die Walzenmühle, die aus zwei sich gegenläufig drehenden Walzen besteht, zwischen denen das Mahlgut durch Druck und Scherung zerkleinert wird. Die Walzen selbst verfügen über eine glatte Oberfläche und der zwischen ihnen eingestellte Abstand bestimmt maßgeblich die Partikelgröße der gemahlenen Kunststoffpartikel.

Welche Mahlart am Besten angewendet wird und welche Parameter zu wählen sind, um eine möglichst gute Ausbeute zu erhalten, hängt sehr stark von der Zusammensetzung des Kunststoffabfalls ab. Die optimale Partikelgröße und Oberflächenbeschaffenheit wird durch den Verwendungszweck des recycelten Kunststoffs bestimmt. Je nach Bedarf können die Kunststoffteile bei scharfer Größenverteilung auf Korngrößen von bis zu 1 µm zerkleinert werden.

Selektion im Kältetunnel

Unmontierter Kältetunnel^I



Beginn des Kältetunnels

Abscheidung schwerer Materialien z.B. mit Wirbelschicht-Schwingtrog-Scheider für Keramikteile, Schrauben, Glas und andere Schmutzstoffe.

Kältegradient im Tunnel

Die stoffspezifische Zersprödungstemperatur und der Kältegradient innerhalb des Tunnels führen dazu, dass manche Stoffe früher zermahlen und aussortiert werden können als andere.

Trennverfahren

Teils in, teils hinter dem Kältetunnel werden die verschiedenen Kunststofffraktionen mechanisch voneinander getrennt, ohne dass der Mahlvorgang unterbrochen wird. Kriterien zur Trennung können Partikelgröße, Dichte, Oberflächenbeschaffenheit oder auch Farbe sein.

Klassieren des Kunststoffgemisches

In der mechanischen Verfahrenstechnik bezeichnet man das Trennen eines Gemisches aus Feststoffen in einzelne Fraktionen als „Klassieren“. Es gibt unzählige Trennverfahren, nachfolgend einige geeignete Beispiele zur Trennung von Kunststoffpartikeln:

Windsichten

Beim Windsichten werden Partikel durch einen Gasstrom voneinander getrennt. Eher schwere Partikel mit geringem Strömungswiderstand werden nicht vom Gasstrom erfasst, leichte Partikel hingegen werden erfasst und weggetragen.

Schwimm- und Sinkverfahren

Beim Schwimm- und Sinkverfahren werden Kunststoffpartikel unterschiedlicher Dichte in einem Kunststoffbad voneinander getrennt.

Sieben

Beim Sieben oder auch Plansichten dienen Siebe mit bestimmter Feinmaschigkeit dazu die unterschiedlich großen Partikel voneinander zu trennen.

Flotation

Bei Partikeln unterschiedlicher Oberflächenbenetzbarkeit können die Fraktionen in einem Gas-Flüssigkeitsgemisch voneinander getrennt werden. In der Regel bildet eine Fraktion einen Schaum, der abgeschöpft werden kann.

Automatisiertes Klauben

Über sensorgestützte Techniken und computergesteuerte Sortierung ist ein automatisiertes Klauben möglich. Hierbei werden Merkmale wie z.B. die Farbe, die sich ansonsten nicht zur Trennung benutzen lassen, für jeden Bestandteil gemessen und die Bestandteile einzeln sortiert.

Vorteile des Kryo-Recycling-Verfahrens

- Zerkleinerung von Thermoplasten ohne Veränderung der Polymerisation ermöglicht direkte Wiederverwendung.
- Recycling von Elastomeren ohne Qualitätsverlust und damit beste Voraussetzung zum Altreifenrecycling.
- Materialtrennung bei Mikroelektronikbauteilen.
- Verfahrenstechnische Erleichterung beim Recycling durch die Pulverisierung der Kunststoffe.
- Primäre und Sekundäre Schonung der fossilen Ressourcen durch Einsparung von zur Neusynthese nötigen Rohstoffen und Energie.
- Positive Energiebilanz und Wirtschaftlichkeit dank hoher Kühleffizienz.
- Vorteile bei der Heizwertnutzung bei Pulvereinblasung in Wirbelschichtöfen.



Kryogene Recycling-Anlage für Altreifen der Firma AGA¹

Grenzen des Kryo-Recycling-Verfahrens

- Additive werden nicht vom Kunststoff getrennt und beeinflussen die Materialeigenschaften.
- Minimale Korngröße des Pulvers liegt bei ca. 1 µm, Komposite geringerer Größenordnung sind nicht klar trennbar.
- Duomere können pulverisiert werden, Frage der Vernetzungsfähigkeit erfordert jedoch weitere Forschung.
- Im Rohgranulat enthaltene Giftstoffe werden weiterverarbeitet.
→ Einschränkung der Anwendungsgebiete durch möglicherweise unbekannte Inhaltsstoffe.
- Alt-Elektronik-Recycling erfordert Veränderungen in der Zusammensetzung durch die Hersteller, beispielsweise Ersatz von giftigen Flammschutzmitteln und Schwermetallen durch ungiftige Substanzen.



Elektronikschrott – ein ungenutztes Elektroniklager^K

Bereits existierende Bestandteile kryogener Recycling-Anlagen



Kryogene Recyclinganlage der Firma Nehlsen¹

Die Voraussetzungen für den Bau einer Anlage im Sinne des Kryo-Recycling-Verfahrens existieren bereits:

- Kühltssystem mit fraktionierter Kältemittelverdampfung innerhalb eines Einkreis-Systems inklusive zugehöriger Steuerung.
- Mühlen, die bei extremer Kälte eingesetzt werden können und in Kältetunnel integriert sind.
- Trennverfahren, um zerkleinerte Kunststoffe sorten- und qualitätsrein zu trennen, auch unter Schutzgas.

Bisher wurden Ein-Kreis-Kühltechnik, Kryo-Mühlen und angemessene Trennverfahren noch nicht gemeinsam in einer Recycling-Anlage eingesetzt. Es existieren jedoch wirtschaftlich genutzte Recyclinganlagen, die Kunststoffe unter Einsatz von flüssigem Stickstoff zerkleinern und trennen, bspw. durch die Firma Dohmeyer in Belgien oder auch die Berliner Firma Alba.

Wirtschaftliche Aspekte

Nach einer von Fach-Ingenieuren der kommunalen Technologieberatung Oberhausen durchgeführten Machbarkeitsstudie^M zur Wirtschaftlichkeit des Altreifen-Recyclings mit verschiedenen Verfahren ist es grundsätzlich möglich das Kryo-Recycling-Verfahren im Rahmen des Kunststoff-Recyclings gewinnbringend einzusetzen. Man rechnet dabei mit siebenmal höherem Nettoerlös im Vergleich zur energetischen Verwertung, also Verbrennung der Kunststoffe.

Das Kryo-Recycling Verfahren könnte damit auch unter den heutigen Bedingungen in vielen Bereichen betriebswirtschaftlich rentabel arbeiten. Es wird bereits basierend auf der relativ teuren Flüssigstickstoff Kühlung in einigen Recyclingfirmen eingesetzt. Basierend auf der hocheffizienten Kühltechnik, die in dieser Broschüre dargestellt wird, könnte Kryo-Recycling eine wichtige Rolle in der Kreislaufwirtschaft spielen. Es kann sich jedoch nicht durchsetzen, solange die Müllverbrennung marktbeherrschend ist, und die Folgekosten von Rohstoffvernichtung und Freisetzung von Giftstoffen auf die Gesellschaft abgewälzt werden. Dies bedeutet eine indirekte Subventionierung der Müllverbrennung zu Lasten des Recyclings. Ein Kreislaufwirtschaftsgesetz, welches diesen Namen auch tatsächlich verdient, muss durchgesetzt werden, welches die Müllverbrennung verbietet und den Weg frei macht für umfassendes rohstoffliches und werkstoffliches Recycling, auch im Bereich der Kunststoffe.

Schlusswort

Das Kryo-Recycling erlaubt Kunststoffe sortenrein wieder zu gewinnen und vor allem ohne Umwelt und Klima zu belasten. Mit der hier dargestellten effizienten Kältetechnik wäre das Verfahren auch energieeffizient und wirtschaftlich. Es könnten zehntausende neue Arbeitsplätze alleine in Deutschland entstehen. Trotz dieser offensichtlichen Vorteile konnte sich das Verfahren bisher nicht durchsetzen. Warum? Ein Grund liegt darin, dass Abfallbeseitigung vor allem unter dem Aspekt betrieben wird, wie damit möglichst viel Profit zu erzielen ist. So gab es durchaus Interessenten und Anfragen an den Verein, die aber das funktionierende Know-How übernehmen und keine Anlagen bis zur Produktionsreife neu aufbauen wollten.

In den letzten Jahren wurden außerdem erhebliche Überkapazitäten in der Müllverbrennung (die fälschlicherweise als ökologisch bezeichnet wird) aufgebaut und aus Gründen der Kapitalrendite sollen diese Kapazitäten weiter ausgelastet werden. Als Folge hat auch der Import von Haus- bis Giftmüll nach Deutschland in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Die negativen Konsequenzen für Umwelt und Gesundheit werden dabei bewusst in Kauf genommen. Dagegen gibt es in vielen Regionen Widerstand der Bürgerinnen und Bürger.

Würde der Umwelt- und Klimaschutz im Mittelpunkt des politischen Handelns in Deutschland stehen, dann würden fortschrittliche Recyclingverfahren wie das Kryo-Recycling gerade auch in Verbindung mit der Einführung der Wertstofftonne gefördert und zur Produktionsreife gebracht werden.

Es gibt zweifellos Fortschritte beim Recycling bestimmter Fraktionen. Aber es wird weiterhin viel zu viel Abfall produziert und unser Planet mehr und mehr vermüllt. Dazu kommt, dass künstliche, giftige und in ihrer Wirkungsweise auf Mensch und Natur nicht erforschte Stoffe in riesigen Mengen verarbeitet und konsumiert werden.

Hier sind, wie die Broschüre zeigt, auch Grenzen für Recycling-Verfahren. Diese gesamte Entwicklung bedroht die Lebensgrundlagen allen Lebens auf unserem Planeten. Moderne Recyclingverfahren sind zentral für eine Kreislaufwirtschaft, können aber nur dann ihre Wirkung voll entfalten und umfassend eingesetzt werden, wenn auch im Produktdesign wesentliche Änderungen vorgenommen werden.

Neben dem Verbot giftiger Stoffe muss eine ganz neue Art der Produktion aufgebaut werden, wo schon beim Design von Produkten das Recyceln eingeplant wird und der Einsatz von Rohstoffen aus Recyclaten im Mittelpunkt steht. Wir brauchen eine Kreislaufwirtschaft, die diesen Namen auch verdient. Alles, was produziert und konsumiert wird, muss wieder verwertet werden können. Die Stoffkreisläufe müssen geschlossen und die gesamte Energieversorgung auf der Basis 100 Prozent erneuerbare Energien organisiert werden. Es ist jedoch fraglich, ob eine Kreislaufwirtschaft mit einer auf privaten Profit ausgerichteten kapitalistischen Wirtschaft vereinbar ist. Profitsteigerung durch Ressourcenverschwendung und Wegwerfproduktion steht im diametralen Gegensatz zu der notwendigen hohen gesamtgesellschaftlichen Rentabilität, die Rohstoffe und Arbeitskraft schont, und eine Nutzung natürlicher Ressourcen auch für zukünftige Generationen ermöglicht.

Danksagung

Hier möchten wir uns sehr herzlich bei allen Personen bedanken, die mit Informationen und kritischen Hinweisen zu dieser Broschüre beigetragen haben, insbesondere bei Birte Riechers, die einen Großteil der Redaktionstätigkeit der Texte und der Erstellung von Grafiken geleistet hat.

Der Herausgeber

Quellenverzeichnis

- A) Statistisches Bundesamt, Abfallbilanz, Wiesbaden:
<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodet=2321>
 [Januar 2012]
- B) Prof. Dr. H. Rosin: „Toxikologie: Müllverbrennung – die chronische Vergiftung“, Umwelt-Medizin-Gesellschaft, 21, 3/2008, S. 16-21
- C) Prof. Dr. H. Rosin, Prof. Dr. C. Jooß: „Müllverbrennung – Die chronische Volksvergiftung“
- D) K. Mohd-Habib, T.E. Boland: „Kryogenic Grinding: A Multitasking Marvel“, Process Cooling, 2011
- E) M. Albrecht: „Grundlegende Berechnung einer Kältekaskade zur Tieftemperatur-Aufbereitung von kunststoffhaltigen Rückständen“, FH Düsseldorf, 1996
- F) Prof. Dr. H. Rosin: „Kryo-Recycling und Kreislaufwirtschaft – Das Verlangen nach Zukunft“, Dokumentation der internationalen Tagung vom Pfingstmontag, Juni 2006, Halle/Saale
- G) M. Bongers: „Kryo-Recycling von glasfaserverstärkten Kunststoffen am Beispiel von Windmühlenrotorblättern“, Georg-August-Universität Göttingen, 2010
- H) Fa. WMC Neuhaus Neotec, Reinbek, Deutschland
- I) Fa. Dohmeyer, Melle, Belgien
- J) Fa. AGA, Frankreich
- K) http://en.wikipedia.org/wiki/File:Recycling_at_Cash_For_Laptops_affiliate.jpg
 [Oktober 2012]
- L) Fa. Nehlsen GmbH & Co. KG, Bremen, Deutschland
- M) H.F. Hinrichs, H. Schätz, S. Harig: „Durchführung einer Vorstudie über das Tieftemperaturverfahren zur Verwertung von Altreifen“, KTB Oberhausen, EKKU Marl, 1994