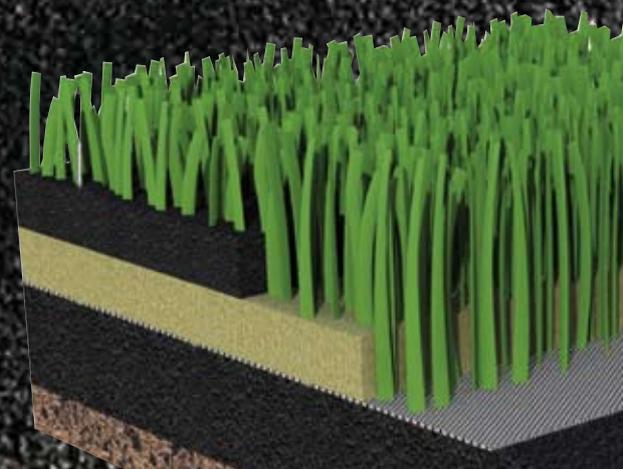


# Ökobilanzieller Vergleich zweier Verwertungsalternativen für Altreifen: Stoffliche Verwertung und Mitverbrennung im Zementofen

## *Kurzfassung*







Copenhagen Resource Institute:  
Ioannis Bakas, Birgitte Jørgensen Kjær



FORCE Technology:  
Anders Schmidt, Nanja Hedal Kløverpris



IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH:  
Regine Vogt, Jürgen Giegrich

# Zusammenfassung

*In dieser Ökobilanz (englisch Life Cycle Assessment – LCA) werden zwei Verwertungsalternativen für Altreifen untersucht: ihre stoffliche Verwertung (Recycling), wobei Gummigranulat aus Altreifen teilweise zur Modifizierung von Asphalt und teilweise als Füllung in Kunstrasen genutzt wird, und ihre Mitverbrennung, wobei Altreifen im Zementofen verbrannt werden. Der Vergleich der beiden Verwertungsalternativen anhand neun verschiedener Umweltwirkungskategorien ergab, dass in allen neun Kategorien die stoffliche Verwertung der Altreifen als umweltverträglichere Variante abschneidet. Der Unterschied zwischen den beiden Entsorgungsoptionen wird in den meisten Umweltwirkungskategorien als bedeutend eingestuft. Eine Ausnahme bildet die Schonung der mineralischen Ressource Eisenerz, die bei beiden Verwertungsarten ähnlich ausfällt. Die Ergebnisse demonstrieren, dass die Verwendung von Altreifen durch Nutzung der gummiartigen Eigenschaften und zur Substitution von Primärgummi gegenüber der Mitverbrennung ökologisch überlegen ist.*

*In der Studie wurden zwei methodische Varianten der Ökobilanz parallel untersucht: die beschreibende Ökobilanzmethode (Attributive LCA – Ermittlung der vom untersuchten Produktsystem ausgehenden Umweltbe- und -entlastungen unter Verwendung von durchschnittlichen Ist-Werten) und die als Basisszenario gewählte folgenorientierte Ökobilanzmethode (Consequential LCA – Ermittlung der durch das Produktsystem induzierten Veränderungen im Wirtschaftssystem und Berechnung der Umweltbe- und -entlastungen unter Verwendung der so identifizierten marginalen Werte).*

*Die im Bericht gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf eine Tonne Altreifen als funktionelle Einheit. Werden diese Ergebnisse des Basisszenarios (Consequential LCA) beispielsweise auf die jährlich in Deutschland anfallende Altreifenmenge von 650.000 Tonnen bezogen, dann entspricht der Vorteil der stofflichen Verwertung gegenüber der Mitverbrennung – berechnet als Differenz zwischen diesen beiden Optionen – z.B. 70.000 so genannten Einwohnerdurchschnittswerten (EDW)<sup>1</sup> beim Treibhauseffekt, 103.000 EDW bzgl. des fossilen kumulierten Energiebedarfs und 96.000 EDW beim Versauerungspotenzial. Auch bei den weiteren untersuchten Umweltwirkungskategorien zeigen sich mehr oder weniger große Vorteile für die stoffliche Verwertung. Nach der beschreibenden Ökobilanzmethode (Attributional LCA) schneidet die Recyclingvariante sogar noch günstiger ab.*

*Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass bei der Mitverbrennung im Zementofen anstatt der Altreifen fossile Brennstoffe eingesetzt werden müssen, also die Mitverbrennung der Altreifen einen fossilen Brennstoff (Stein- und/oder Braunkohle) ersetzt. Regulär setzen Zementwerke neben fossilen Brennstoffen auch Abfälle als Ersatzbrennstoffe ein. Würde anstatt der Altreifen ein anderer Abfall zur Mitverbrennung eingesetzt werden, fällt die durch die stoffliche Verwertung erzielbare Entlastung noch höher aus.*

*Die Studie wurde im Auftrag des dänischen Altreifenverwertungsunternehmens Genan Business & Development A/S gemeinsam vom Copenhagen Resource Institute (CRI, Dänemark), FORCE Technology (Dänemark) und dem Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) Heidelberg durchgeführt. Sie entspricht den ISO-Standards 14040 und 14044; das Peer Review erfolgte durch ein unabhängiges internationales Team von drei Experten unter der Leitung der Fundación Gaiker, einem spanischen Technologiezentrum.*

## Hintergrund

Für die Behandlung von Abfällen gibt das EU-Abfallrecht eine bestimmte Rangordnung vor. Als allgemeine Regel gilt danach die stoffliche Verwertung als umweltfreundlicher als die energetische Verwertung, die Deponierung wird als umweltschädlichste Behandlungsoption erachtet. Noch vor einem Jahrzehnt war in vielen EU-Mitgliedsstaaten die Deponierung der verschiedensten Abfälle wie Altreifen, Tierfette und

---

<sup>1</sup> 1 EDW entspricht der Umweltbelastung, die pro Jahr durch einen Einwohner verursacht wird.

-mehle, Textilien, Abfälle aus der Holz- und Papierindustrie oder Kunststoffe üblich. Seit 2006 ist die Deponierung von Altreifen in der EU verboten, was zur Diskussion darüber führte, welches die umweltverträglichste Verwertungsoption für Altreifen sei.

Eine branchenübergreifend definitiv gültige Aussage zur Frage *Abfälle energetisch oder stofflich verwerten* ist nicht möglich. In den letzten Jahren wurden die beiden Varianten Verbrennung im Zementofen und stoffliche Verwertung für verschiedene Materialien, u. a. Papier, Klärschlamm, Altöl und Kunststoff, untersucht. Folgende Kernaussage lässt sich daraus ableiten: Wenn der Verwertungsprozess mit relativ hohem Energie- und/oder Materialbedarf verbunden ist und erzeugte Sekundärprodukte kein gleichwertiger Ersatz für hochwertige Neumaterialien sind, ist eine Verbrennung im Zementofen voraussichtlich umweltverträglicher.

### Die Methode der Ökobilanz

Die Ökobilanz, englisch LCA, ist eine Methode zur Ermittlung der Umweltwirkungen eines bestimmten Produkts, einer Dienstleistung oder eines Systems, bei der nach dem Prinzip „Von der Wiege bis zur Bahre“ alle bekannten Umweltwirkungen aus einem ganzheitlichen Blickwinkel betrachtet werden. Der Lebensweg schließt dabei sämtliche bekannten Prozesse von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung des betrachteten Produkts ein. Der ganzheitliche Ansatz ist EU-weit inzwischen zunehmend akzeptiert, und „ökobilanzielles Denken“ hat bereits in zahlreiche abfallwirtschaftliche Strategien und Regelwerke Eingang gefunden.

Die Ökobilanz nach den ISO-Standards 14040 und 14044 gliedert sich in vier Phasen (Abbildung A). Erster Schritt – Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen: Beschreibung von Zweck, Inhalt und Grenzen der Untersuchung sowie des Untersuchungsgegenstandes und seiner Systemgrenzen. Zweiter Schritt – Sachbilanz: Erfassung und Zusammenstellung der Stoff- und Energieumsätze aller zum Produktlebenszyklus gehörigen Prozesse. Ausgehend von der Sachbilanz erfolgt im dritten Schritt die Wirkungsabschätzung und im vierten die Auswertung der Ergebnisse. Die Ökobilanz ist per definitionem ein iterativer Prozess.

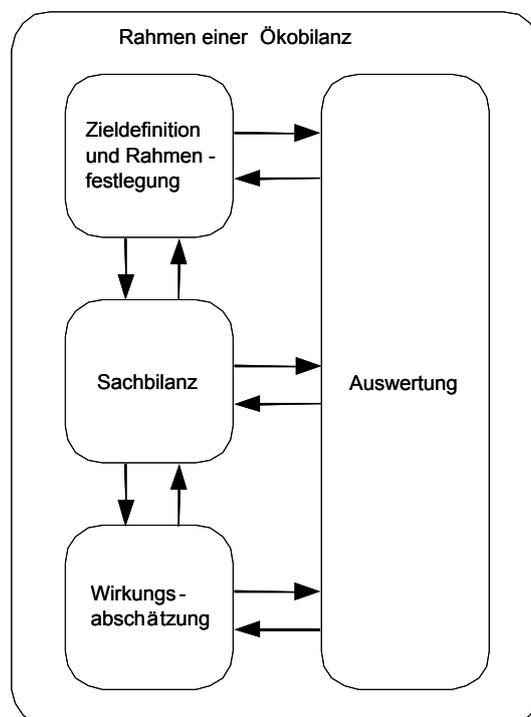


Abbildung A: Phasen der Ökobilanz (ISO, 2006)

Die Ökobilanzmethode wird zunehmend als Entscheidungsfindungsinstrument verwendet. Auch hat sich die Anwendung der Methode von der Untersuchung von beschreibenden Ist-Szenarien hin zur Untersuchung von Szenarien verlagert, welche die Konsequenzen einer Veränderung darstellen. Der ursprüngliche Ansatz heißt Attributional LCA und verwendet durchschnittliche Werte für jede einzelne Prozesseinheit im gesamten Lebenszyklus. Der zweite Ansatz, Consequential LCA genannt, konzentriert sich auf die Untersuchung aller bekannten Folgen einer Änderung, und zwar auch für Prozesseinheiten, die nicht unmittelbar zum betrachteten Lebenszyklus gehören.

In der wissenschaftlichen Praxis ist der Übergang zwischen einem strikt folgenorientierten und einem strikt beschreibenden Ansatz fließend, und beide Methoden sind nach der ISO-Ökobilanznorm zulässig. Die folgenorientierte Methode (Consequential LCA) eignet sich besonders für den Vergleich zweier Produkte oder Prozesse. Da es sich bei der vorliegenden Studie um eine vergleichende Ökobilanz handelt, wurde hauptsächlich mit der folgenorientierten Methode gearbeitet. Der beschreibende Ansatz (Attributional LCA) wird jedoch nach wie vor international praktiziert, auch bei vergleichenden Untersuchungen. Um eine möglichst weite Akzeptanz der Ergebnisse zu erzielen, wurde daher in der vorliegenden Studie ergänzend mit dem beschreibenden Ansatz gearbeitet. Beide Methoden sind ausführlich inhaltlich und im Hinblick auf die sich daraus ergebenden Ergebnisunterschiede in der vorliegenden Studie beschrieben.

### Untersuchungsrahmen der Studie

Die Studie vergleicht die Mitverbrennung von Altreifen als Energie- und Eisenlieferant in Zementöfen mit der stofflichen Verwertung der Altreifen zur Nutzung als Zuschlagsstoff in Gummiasphalt (Feinfraktion < 1,4 mm) und zur Nutzung als Füllung in Kunstrasen (> 1,4 mm) (Abbildung B). Bei der stofflichen Verwertung werden die Reifen zerkleinert, die Textil- und Stahlbestandteile werden abgetrennt. Das verbleibende Gummi wird vor dem Einsatz in gummimodifiziertem Bitumen und als Kunstrasenfüllung granuliert. Die Textilanteile werden im Zementofen verbrannt, die Stahlanteile werden recycelt. Durch die stoffliche Verwertung werden verschiedene Prozesse wie die Herstellung von Synthekautschuk vermieden.

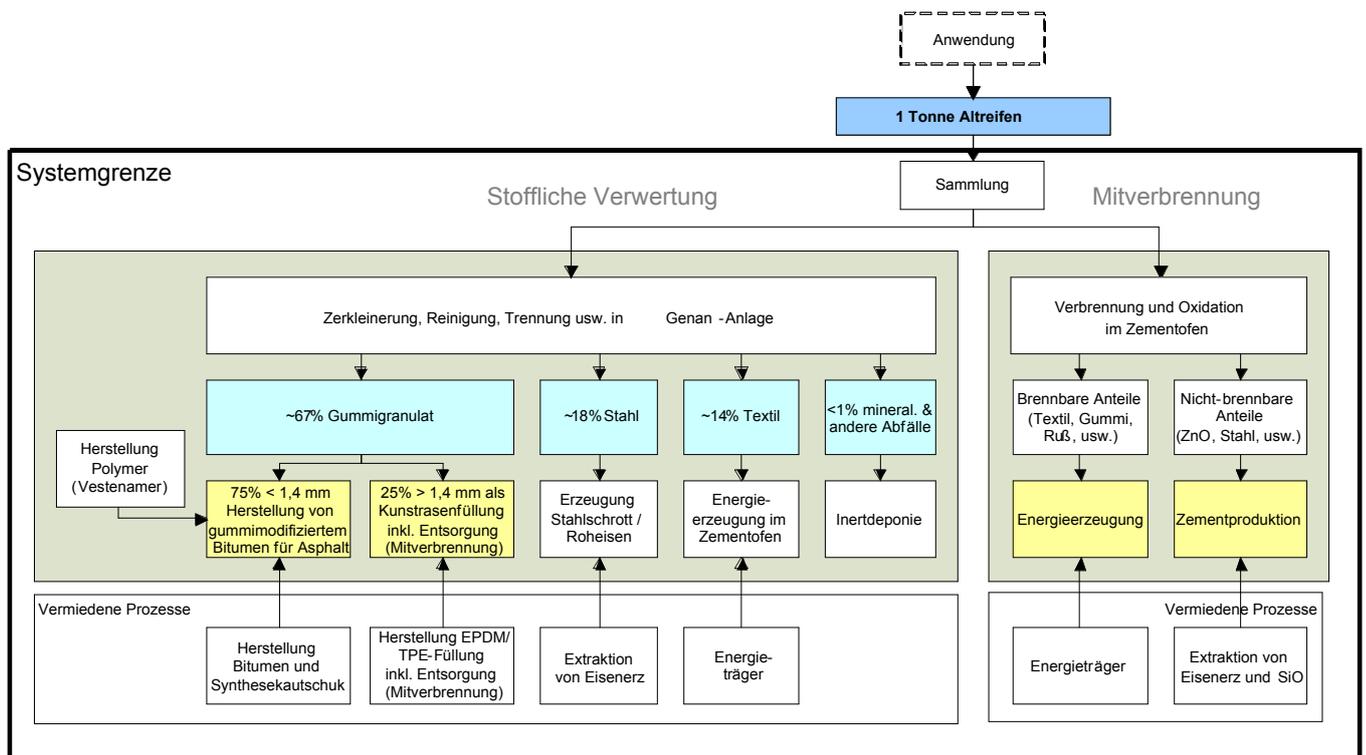


Abbildung B: Untersuchtes System mit Systemgrenzen

Bei der Mitverbrennung werden die Altreifen ganz oder zerkleinert im Zementofen verbrannt. Dabei wird nicht nur eine Energiequelle bereitgestellt, sondern, durch den im Altreifen enthaltenen Stahl, auch für die Zementproduktion benötigtes Eisen. Durch die Mitverbrennung werden demnach die Energieerzeugung aus anderen Brennstoffen und die Extraktion von Eisenerz vermieden.

Ein Wechsel von der Mitverbrennung hin zur stofflichen Verwertung bedeutet einen gesteigerten Bedarf für andere Brennstoffe und für Eisenerz aus anderen Quellen für die Mitverbrennung, während die Emissionen durch die Verbrennung von Altreifen vermieden werden.

Es wurden zwei Szenarien untersucht: ein Kurzzeitszenario (2010) unter Zugrundelegung u. a. des aktuellen Stands hinsichtlich Technik und Energiemix, und ein Langzeitszenario (2020), das Technik, Energiemix, Verwertungsmengen und Skaleneffekte entsprechend projiziert. Der geografische Geltungsbereich der Studie ist Europa, die Modellierung erfolgte basierend auf einer repräsentativen Recyclinganlage und eines in Deutschland gelegenen Zementwerks.

Die Ökobilanz untersucht aus einem ganzheitlichen Blickwinkel die Umweltwirkungen und den Ressourcenverbrauch durch die einzelnen Prozesse beider Verwertungsoptionen. Dabei wird berücksichtigt, dass die Altreifen durch das Recycling andere Materialien in der Asphaltherstellung und als Kunstrasenfüllung ersetzen (Bitumen, Polymere) bzw. andere Energieträger bei der Herstellung von Zement.

Die ermittelten Be- bzw. Entlastungen werden über so genannte Umweltwirkungskategorien bewertet. Das Ergebnis versteht sich dabei immer als *potenzielle* Umweltwirkung, da sich der *tatsächliche* Effekt, etwa von CO<sub>2</sub>-Emissionen, nur bei deren faktischem Auftreten konkret beziffern lässt. In dieser Studie werden folgende Umweltwirkungskategorien betrachtet:

- Treibhauseffekt in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten: Treibhausgase wie Kohlendioxid und Methan tragen zum Klimawandel bei.
- Versauerung in g SO<sub>2</sub>-Äquivalenten: In die Atmosphäre abgegebene Säuren und saure Folgeprodukte können als saurer Regen lokale Ökosysteme schädigen.
- Eutrophierung, aquatisch in g PO<sub>4</sub>-Äquivalenten: Stickstoff und Phosphor können zu Anreicherung von Nährstoffen in Ökosystemen führen. In Gewässern bewirkt dies ein verstärktes Algenwachstum, das zur Zerstörung von Ökosystemen führen kann.
- Eutrophierung, terrestrisch in g PO<sub>4</sub>-Äquivalenten: Stickstoff und Phosphor können zu Anreicherung von Nährstoffen in Ökosystemen führen. In Böden kann dies bewirken, dass nährstoffarme Ökosysteme verschwinden.
- Humantoxizität (Krebsrisiko) in mg Arsen-Äquivalenten: Bestimmte chemische Verbindungen können bei Menschen und Tieren Krebs auslösen.
- Humantoxizität (akute Humantoxizität: PM<sub>10</sub><sup>2</sup>-Risiko) in g PM<sub>10</sub>-Äquivalenten: bei der Erhöhung der Immissionskonzentration von PM<sub>10</sub>-Feinstaub steigt das Mortalitätsrisiko infolge von Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen.
- Photochemische Ozonbildung (Sommersmog) in g Äthylen-Äquivalenten: Lösemittel und andere flüchtige organische Verbindungen reagieren mit Stickoxiden und bilden den so genannten Sommersmog, der sowohl für die menschliche Gesundheit als auch für Ökosysteme schädigend wirkt.

Zwei weitere Indikatoren dienen der Ermittlung des Ressourcenverbrauchs:

- Kumulativer Energieaufwand (Bilanz der fossilen Energieträger) in GJ
- Nicht-energetischer Ressourcenverbrauch in kg Eisenerz (in dieser Studie ist nur Eisen von Relevanz)

---

<sup>2</sup> Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser unter 10 Mikrometer

Auf der Grundlage aller Stoff- und Energieströme der am untersuchten System beteiligten Prozesse werden für die einzelnen Wirkungskategorien die Belastungen sowohl für das Recycling als auch die Mitverbrennung ermittelt. Die jeweilige Bezugsgröße für alle Werte ist eine Tonne Altreifen.

### Ergebnisse

Die Ergebnisse des Kurzzeit- und des Langzeitszenarios unter Verwendung der folgenorientierten Methode finden sich in Tabelle A. Es ist festzuhalten, dass die Ergebnisse die Umweltwirkungen durch die Herstellung und die Nutzung der Reifen, die für beide Vergleichsoptionen gleich sind, nicht beinhalten. Dargestellt sind Nettoergebnisse, also die Differenz zwischen Belastungen (Emissionen) und Entlastungen (Gutschriften für vermiedene Emissionen) aus der Verwertung. Überwiegen die Umweltentlastungen, ergeben sich negative Werte. Dies ist bei beiden Alternativen der Fall, folglich tragen beide Verwertungsoptionen zu einer Umweltentlastung bei. Umso höher der negative Wert, desto größer ist der Entlastungsbeitrag.

Aus Tabelle A geht hervor, dass die stoffliche Verwertung sich in allen Umweltwirkungskategorien als die umweltverträglichere Option erweist. Die Differenz zwischen den Verwertungsoptionen ist dabei in bedeutenden Umweltwirkungskategorien wie dem Treibhauseffekt, der Einsparung fossiler Energieträger und dem Versauerungspotenzial sehr groß. Hinsichtlich der Schonung der mineralischen Ressource Eisenerz ist die Differenz allerdings nicht signifikant, und auch beim Eutrophierungspotenzial ist der Unterschied zwischen den Verwertungsoptionen nahezu ohne Bedeutung wie aus den in Abbildung C dargestellten Ergebnissen ersichtlich wird. Unsicherheitsfaktoren, soweit bekannt, wurden einer ausführlichen Unsicherheitsanalyse unterzogen.

**Tabelle A: Ergebnisse der Kurzzeit- und Langzeitszenarios mit der folgenorientierten Methode**

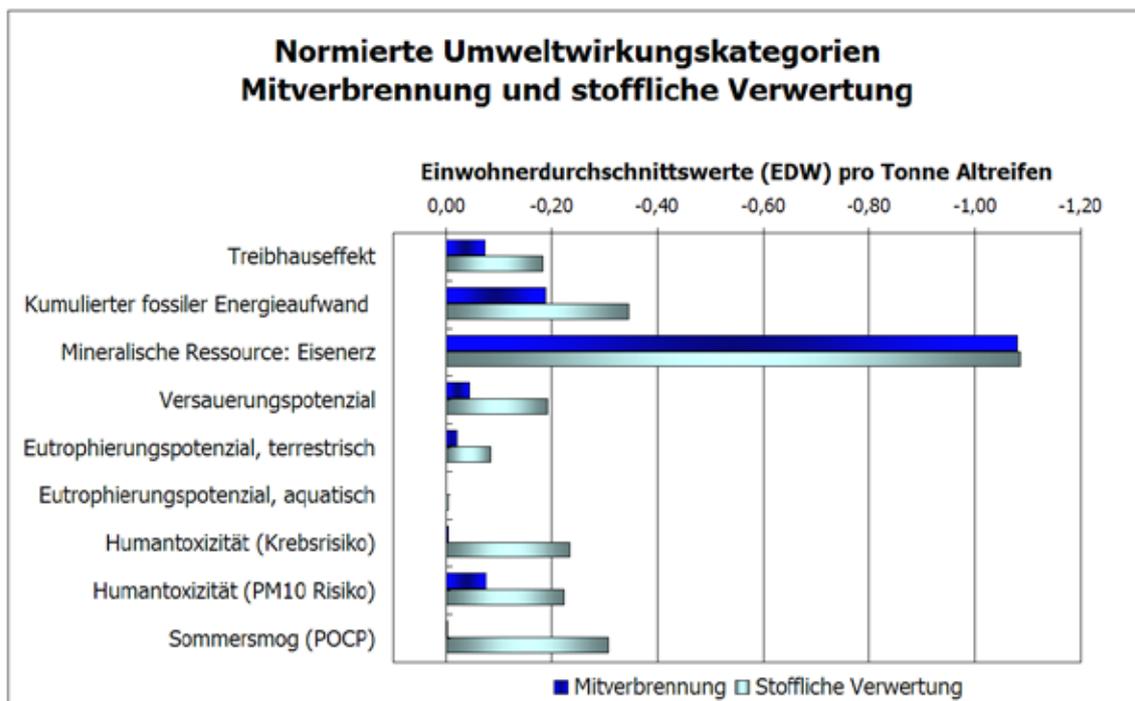
Umweltwirkungskategorie (Einheit pro Tonne Altreifen)	Kurzfristig		Langfristig	
	Mitverbrennung	stoffliche verwertung	Mitverbrennung	stoffliche Verwertung
Treibhauseffekt (kg CO <sub>2</sub> -Äq.)	-796	-1922	-792	-1892
Fossile Energieträger (GJ)	-27	-50	-27	-49
Eisenerz (kg)	-398	-400	-398	-399
Versauerungspotenzial (g SO <sub>2</sub> -Äq.)	-1561	-6804	-1555	-6744
Eutrophierungspotenzial, terrestrisch (g PO <sub>4</sub> -Äq.)	-103	-411	-103	-420
Eutrophierungspotenzial, aquatisch (g PO <sub>4</sub> -Äq.)	-0,001	-18	-0,0003	-19
Krebsrisikopotenzial (mg As-Äq.)	-26	-1255	-26	-1235
PM10-Risikopotenzial (g PM10-Äq.)	-1999	-5871	-1995	-5875
Sommersmog (g Äthylen-Äq.)	-49	-4737	-49	-4740

Die Ergebnisse der Kurzzeitszenarios zeigen gegenüber denen der Langzeitszenarios bei allen neun Umweltwirkungskategorien keine signifikanten Unterschiede. Die stoffliche Verwertung zeigt teilweise einen leichten Rückgang und teils einen leichten Anstieg der Entlastungen über die nächsten 10 Jahre. Insgesamt liegen die Abweichungen < 5% und sind wahrscheinlich nicht größer als die allgemeine Unsicherheitsbandbreite der Ergebnisse. Die Ergebnisse für die Mitverbrennung verändern sich nur marginal vom Kurzzeitszenario zum Langzeitszenario und werden ebenfalls als nicht signifikant angesehen. Entsprechend wird abschließend für das Basisszenario ersichtlich, dass die stoffliche Verwertung sowohl kurz- als auch langfristig die bessere Verwertungsoption darstellt. Diese Schlussfolgerung ist konsistent, da

sie für alle untersuchten Umweltwirkungskategorien gilt, und sie hat auch dann Bestand, wenn im Recyclingprozess die Korngrößenverteilung des Gummigranulats verändert wird.

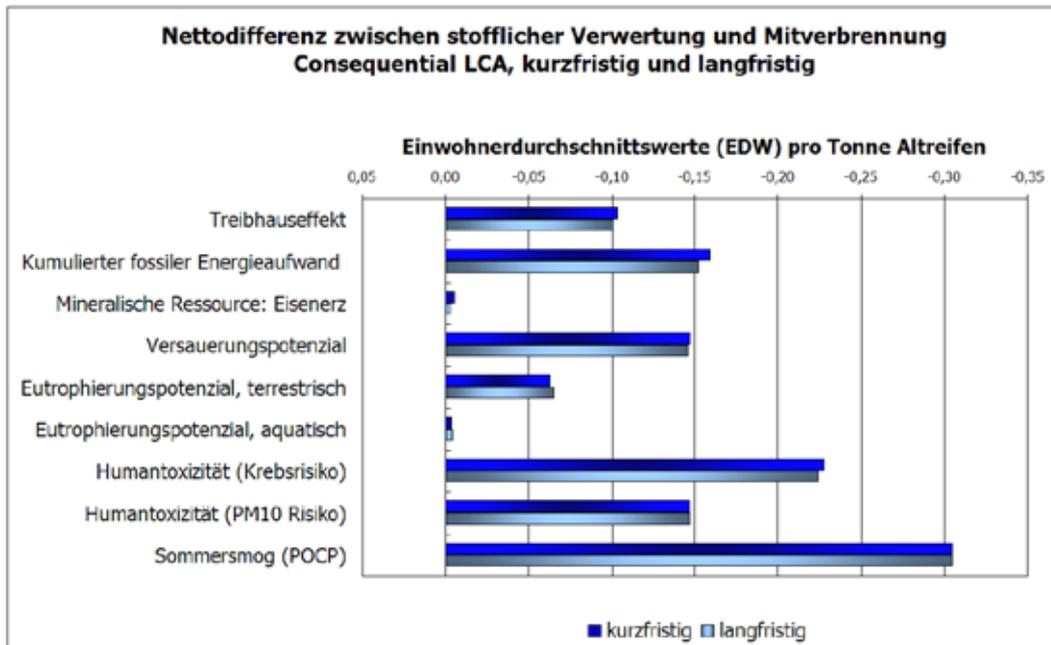
Die beiden folgenden Abbildungen C und D zeigen die Ergebnisse des Vergleichs grafisch. Als Einheit wurden *Einwohnerdurchschnittswerte* verwendet. Diese geben die resultierenden Umweltwirkungen durch die Verwertung einer Tonne Altreifen relativ zu den jährlich von einem Einwohner verursachten Belastungen einer bestimmten Umweltwirkungskategorie (Treibhauseffekt, Versauerung usw.) an. Für den Treibhauseffekt ist die Referenz Emissionen pro Einwohner in Westeuropa, für alle weiteren Umweltwirkungskategorien wurden entsprechende Daten von Deutschland als Referenz herangezogen.

Abbildung C zeigt, dass die stoffliche Verwertung in allen Umweltwirkungskategorien in mehr oder weniger großem Umfang vorteilhaft ist. Bei der Schonung von Eisenerz ist der Vorteil allerdings vernachlässigbar gering, die Umweltentlastungen der Mitverbrennung und der stofflichen Verwertung sind nahezu identisch. Für die aquatische Eutrophierung wird aus der Abbildung deutlich, dass die Umweltentlastungen bei beiden Verwertungsoptionen kaum sichtbar und damit ohne praktische Bedeutung sind.



**Abbildung C: Potenzielle Umweltentlastung bei Mitverbrennung und stofflicher Verwertung in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Tonne Altreifen (kurzfristig, Consequential LCA)**

Abbildung D zeigt die Differenz der Nettoergebnisse der Mitverbrennung und der stofflichen Verwertung sowohl für das Kurzzeitszenario als auch für das Langzeitszenario. Negative Werte hier bedeuten einen ökologischen Vorteil für die stoffliche Verwertung. Die Abbildung zeigt, dass die Unterschiede zwischen den beiden Verwertungsoptionen bei den meisten Umweltwirkungskategorien bedeutend sind und dass die Ergebnisse vom Kurzzeitszenario zum Langzeitszenario konsistent sind, das heißt sich über die nächsten 10 Jahre nur wenig ändern.



**Abbildung D: Umweltentlastung durch stoffliche Verwertung statt Mitverbrennung  
in EDW pro Tonne Altreifen**

Die Ergebnisse weisen die Größenordnung der erzielbaren Umweltentlastung aus, wenn Altreifen einer stofflichen Verwertung statt einer Mitverbrennung zugeführt werden. Abgesehen von der Schonung von Eisenerz und dem aquatischen Eutrophierungspotenzial, bei denen die stoffliche Verwertung nur wenig günstiger ausfällt, zeigen die Ergebnisse, dass zwischen 0,07 und 0,31 Einwohnerdurchschnittswerte pro Tonne Altreifen eingespart werden können, wenn diese stofflich verwertet und nicht mitverbrannt werden.

### Wesentliche Annahmen

In jeder Ökobilanz ist die Quantifizierung der Umweltwirkungen nur auf der Grundlage verschiedener qualifizierter Annahmen möglich. Das Aufstellen solcher Annahmen gehört zum regulären Prozedere der Ökobilanz, wobei die gezogenen Schlüsse von einigen dieser Annahmen besonders stark abhängen. Zur Prüfung ihrer Belastbarkeit werden die Annahmen nachvollziehbar erläutert und die als bedeutend darunter erkannten Parameter für Parameter einer Sensitivitätsanalyse unterzogen.

Eine frühere Studie für Genan zeigte, dass die Ergebnisse für den so genannten Nassprozess der Herstellung von polymermodifiziertem Asphalt anwendbar sind. Sie sind dagegen nicht in vollem Umfang anwendbar für den so genannten Trockenprozess der Asphaltherstellung, da in diesem Fall Sand und Schotter anstatt Bitumen ersetzt würden (Villanueva et. al. 2008). Diese Feststellung hat auch für die vorliegende Studie Bestand.

Eine weitere grundlegende Annahme bezieht sich darauf, welche Energieträger durch die Altreifen im Zementofen substituiert werden. In der früheren Studie wurde angenommen, dass kurzfristig Steinkohle und langfristig Braunkohle ersetzt würden, woraus sich langfristig geringere Umweltentlastungen für die Mitverbrennung ergeben. In der vorliegenden Studie wurde aufgrund der aktuellen Marktentwicklung angenommen, dass sowohl kurz- als auch langfristig jeweils zur Hälfte Stein- und Braunkohle ersetzt werden. Entsprechend ergeben sich nur geringe Unterschiede zwischen dem Kurzzeit- und dem Langzeitszenario der Mitverbrennung.

Bei einer Substitution von Abfall fällt die Verwertungsoption Mitverbrennung ungünstiger aus, und die stoffliche Verwertung schneidet dementsprechend noch besser ab. Unter der Annahme im folgenorientierten

Ansatz (Consequential LCA), dass kurzfristig anstelle von Altreifen Tiermehl oder Kunststoffabfälle als Brennstoff im Zementofen zum Einsatz kommen, lassen sich durch die stoffliche Verwertung gegenüber der Mitverbrennung etwa 2,6 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Tonne Altreifen einsparen. Für den deutschen Jahreswert von 650.000 Tonnen Altreifen ergäbe diese Substitution die Vermeidung von jährlich etwa 1.690.000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, was den Treibhausgasemissionen entspricht, die etwa 155.000 Deutsche pro Jahr verursachen.

Eine der durchgeführten Sensitivitätsanalysen belegt, dass die Vorteilhaftigkeit der stofflichen Verwertung nur in begrenztem Umfang von der Korngrößenverteilung des erzeugten Gummigranulats abhängt. So liegt die Umweltentlastung für den Treibhauseffekt zwischen 1.684 und 2.034 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne Altreifen je nachdem ob bei der Granulierung zu 25% oder zu 100% eine Feinfraktion (< 1,4 mm) erzeugt wird. Die meisten weiteren untersuchten Umweltwirkungskategorien zeigen ein ähnliches Bild. Im Vergleich dazu liegt die Umweltentlastung der Mitverbrennung beim Treibhauseffekt bei rund 800 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne Altreifen. Der Hauptgrund dafür, dass die stoffliche Verwertung unabhängig von der Korngrößenverteilung des erzeugten Gummigranulats gegenüber der Mitverbrennung vorteilhaft ist, liegt darin, dass sowohl die Feinfraktion (< 1,4 mm) als auch die etwas gröbere Fraktion (> 1,4 mm) in Anwendungen gelangen bei denen sie Primärpolymere ersetzen. Dabei ersetzt die Feinfraktion durch die Verwendung in gummi-modifiziertem Asphalt in größerem Umfang Primärpolymere als die Anwendung der etwas gröberen Fraktion als Kunstrasenfüllung, woraus sich die obige Bandbreite erklärt.

Die vorliegende Studie beruht größtenteils auf deutschen und dänischen Daten, ihre Ergebnisse sind jedoch auf den gesamteuropäischen Raum übertragbar. Die Übertragbarkeit der Daten wurde durch eine Sensitivitätsanalyse der standortabhängigen Prozesse sichergestellt.

Es wurden beide Methodenvarianten – *folgenorientiert* und *beschreibend* – parallel eingesetzt. Das Basisszenario, auf das sich die hier genannten Ergebnisse beziehen, wurde mit dem folgenorientierten Ansatz (Consequential LCA) berechnet. Nach den Berechnungen anhand des beschreibenden Ansatzes (Attributional LCA) erwies sich die stoffliche Verwertung sogar als noch umweltverträglicher gegenüber der Mitverbrennung.

Die in den Ergebnissen beobachteten Unterschiede der beiden Methodenvarianten unterstreichen den Vorteil, einen breiten Ansatz für die Durchführung von vergleichenden Ökobilanzen zu wählen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse beider Ansätze verglichen und analysiert werden können. Die Befürworter beider Seiten der Grundsatzdiskussion, welcher Ansatz der bessere ist, der *folgenorientierte* oder der *beschreibende*, haben somit einen Zugang zu den Ergebnissen. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass beide Ansätze zu den gleichen Schlussfolgerungen führen. Dies stellt eine weitere Bestätigung der Glaubwürdigkeit der Studie und der Robustheit der Ergebnisse dar.

