

ALTREIFEN ENTSORGUNG

Was ist ökologisch sinnvoll?



im Auftrag von



27. März 2003

Impressum

Verfasser: Dr. Andreas Bally
BiCon AG
CH – 8280 Kreuzlingen
bally@bicon-ag.ch

Auftraggeber: Verkehrs-Club der Schweiz VCS
Rolf Albisser
Postfach
CH – 3000 Bern 2
Tel. 031 328 82 00
Fax 031 328 82 01
rolf.albisser@verkehrsclub.ch
www.verkehrsclub.ch

Publikationsdatum: 27. März 2003

Dieser Bericht wurde nach bestem fachlichem Wissen erstellt. Der Bericht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Verwendung bzw. Verwertung von Angaben oder Informationen aus diesem Bericht erfolgt auf eigenes Risiko. Viele Quellen werden im Bericht genannt und können von Interessierten selbst überprüft werden.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung.....	1
2. Kurzfassung.....	1
3. Definitionen, Begriffe, Abkürzungen.....	2
4. Reifenherstellung.....	3
Kautschuk & Gummi.....	3
Russherstellung.....	4
Chemische Beschaffenheit von Reifen.....	5
Reifenaufbau.....	6
5. Altreifenentsorgung.....	7
Altreifenaufkommen und Entsorgungswege.....	7
Varianten der Altreifenverwertung und -entsorgung.....	9
 Szenario 1: Altreifenverwertung in Zementwerken	
6. Zementherstellung.....	13
Klinkerbrennprozess.....	13
Materialbilanz der Klinkerherstellung.....	14
Energiebedarf der Klinkerherstellung.....	14
Stofftransporte.....	16
7. Verbrennung von Abfall in Zementfabriken.....	17
Konzepte und Strategien des Bundes.....	17
Emissionen von Zementwerken.....	18
 Szenario 2: Altreifenverwertung durch «Reverse Polymerization»	
8. Das Verfahren von EWI: «Reverse Polymerization».....	24
Vergleich mit einer Pyrolyse-Anlage in Deutschland.....	26
Formex-Verfahren.....	28
9. Entsorgungsgebühren.....	28
10. Bewertung der Entsorgungswege.....	29
11. Bestehende LCA-Studien.....	32
Studie des UBA Berlin.....	32
LCA eines durchschnittlichen europäischen PW-Reifens.....	33
12. Zusammenfassung und Ausblick.....	34
Publikationen.....	36
Websites.....	37

1 EINLEITUNG

Bis am 31.3.2003 läuft die Frist für Stellungnahmen zum Entwurf der neuen <Verordnung über den Verkehr mit Abfällen VeVA>. Die neue VeVA ersetzt die <Verordnung über den Verkehr mit Sonderabfällen VVS> vom 12.11.1986 und passt diese den seither geänderten rechtlichen Grundlagen und abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten an. Insbesondere wird das in der Schweiz gültige Abfallverzeichnis mit demjenigen der EU harmonisiert.

«Mit der Revision sollen auch gewisse Abfallkategorien, deren Entsorgung zunehmend zu Problemen führte, neu einer sachgerechten Kontrolle unterstellt werden», wie das UVEK schreibt. Dazu gehört unter anderem der Umgang mit Altreifen im Inland und eine strengere Bewilligungspraxis des zur Zeit ökologisch zweifelhaften Exports ins Ausland; Altreifen werden daher neu zu <kontrollpflichtigem Abfall>.

Nach Ansicht des Verkehrs-Club der Schweiz VCS zeigen die Interessenvertreter der Reifen- und Autoindustrie wenig Interesse an einer möglichst umweltgerechten Entsorgung von Altreifen. Zusammen mit dem BUWAL betrachten sie die Verwertung von Altreifen in der Zementherstellung als derzeit beste Variante der Entsorgung. Die Abfallentsorgung in Zementwerken stösst bei den Umweltorganisationen aber seit langem auf Skepsis. Zudem befürchtet der VCS, dass mit Inkrafttreten der VeVA dieser Entsorgungsweg für Altreifen <zementiert> werden könnte. Der VCS beabsichtigt daher, die Gelegenheit der Vernehmlassung zu nutzen, um neue Konzepte und Strategien in die politische Diskussion einzubringen.

Um die Vernehmlassungsantwort auf einem fachlichen Fundament abstützen zu können, beauftragte der VCS Anfang Februar 2003 die BiCon AG, im In- und Ausland zu recherchieren, wie mit Altreifen umgegangen wird und abzuklären, ob allenfalls umweltgerechtere Verfahren oder Strategien bekannt sind. Insbesondere sollte die Verwertung von Altreifen in Zementwerken und ein neues kanadisches Verfahren (<reverse polymerization>) näher betrachtet werden.

Der vorliegende Bericht wurde in kurzer Zeit nach bestem Wissen erstellt. Der Bericht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Verwendung bzw. Verwertung von Angaben oder Informationen aus diesem Bericht erfolgt auf eigenes Risiko.

2 KURZFASSUNG

Wie bei anderen Abfallarten zeigt sich auch bei der Altreifenentsorgung, dass verschiedene erprobte Verwertungswege entwickelt wurden und erfolgreich betrieben werden können. Innovative, neue Verfahren, welche den <Recyclinggrad> (Menge und Qualität der zurückgewonnenen Wertstoffe) erhöhen wollen, stehen in einem harten Wettbewerb. Einerseits muss die ökonomische und ökologische Bilanz günstig(er) ausfallen und andererseits müssen sie sich gegen die Konkurrenz der etablierten <Grossentsorger> durchsetzen.

Die Entsorgung von Altreifen in der Zementherstellung ist in Europa gängige Praxis und – aus Umweltschutzsicht – keineswegs die schlechteste Lösung. Innovative Recycling-Verfahren haben derzeit aber noch relativ schlechte Karten, weil sie im grossindustriellen Massstab kaum erprobt sind. Weil die EU aber immer mehr auf Kreislaufwirtschaft, d.h. Recycling setzt, steigt der Druck auf die Reifen- und Autobranche. Diese politischen Rahmenbedingungen führten dazu, dass z.B. in Deutschland zur Zeit ein erstes grosses Recyclingwerk für 60'000 t Altreifen pro Jahr gebaut wird.

Die ökologisch weitaus beste Lösung ist aber, den Reifen so lange wie möglich zu fahren. Runderneuerte Reifen werden zu wenig vermarktet und propagiert, obwohl sie qualitativ nicht minderwertig sind. Es braucht daher in erster Linie eine Aufklärungs- und Imagekampagne zugunsten runderneuerter Reifen.

3 DEFINITIONEN, BEGRIFFE, ABKÜRZUNGEN

Abfall	Es gibt verschiedene Arten von Abfall. Die VeVA unterscheidet u.a. Sonderabfall und kontrollpflichtigen Abfall. Welche Abfälle zu den Sonderabfällen zählen, ist in der noch gültigen VVS im Anhang 2 definiert. Mit der Einführung der VeVA wird die VVS aufgehoben und durch die LVA ersetzt. Neu ist die Kategorie der kontrollpflichtigen Abfälle, zu der die Altreifen zählen werden.
BLIC	European Association of the Rubber Industry (& European Car Tyre Manufacturers)
BPEO	Best Practicable Environmental Option
BTU	British Thermal Unit (1 BTU = 1'055.06 J = 0.252 kcal)
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
EDW	Einwohnerdurchschnittswert
ETRA	European Tyre Recycling Association, Paris
EUSTEX	European Scrap Tyre Exchange (Europ. Altreifenbörse)
EWI	Environmental Waste International, kanadische Firma
GRE	Güteschutzgemeinschaft Reifenerneuerung
GSA	Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern
Holcim	Grösster Zementhersteller der Schweiz, nannte sich früher Holderbank
KEA	kumulierter Energieaufwand
KVA	Müllverbrennungsanlage
LCA	Life Cycle Assessment («Ökobilanzierung»)
LRV	Luftreinhalteverordnung, vom 16. Dezember 1985
LVA	Verordnung des UVEK über Listen zum Verkehr mit Abfällen (in Vernehmlassung). Die LVA enthält eine Abfallliste und bezeichnet kontrollpflichtige und Sonderabfälle.
LW	Lastwagen
PW	Personenwagen
TVA	Technische Verordnung über Abfälle, vom 10. Dezember 1990 (wird durch VeVA leicht geändert)
UBA	deutsches Umweltbundesamt, Berlin
UK	England
UTWG	Used Tyre Working Group, UK
VCS	Verkehrs-Club der Schweiz
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
VeVA	Verordnung über den Verkehr mit Abfällen, in Vernehmlassung
VVS	Verordnung über den Verkehr mit Sonderabfällen, vom 12. November 1986 (soll nun durch die VeVA und LVA ersetzt werden)

4 REIFENHERSTELLUNG

4.1 Kautschuk & Gummi

Naturkautschuk ist eine im Milchsafte (<Latex>) tropischer Wolfsmilchgewächse (vor allem Kautschukbaum *Hevea brasiliensis*) enthaltene langkettige Kohlenwasserstoffverbindung. Die Grundeinheit ist Isopren, das ungefähr 5000-fach in einem Kettenmolekül aneinandergereiht ist (ergibt ein Molekulargewicht von 250'000 – 300'000). Naturkautschuk besteht zu knapp 90% aus Kohlenstoff, den die Pflanzen aus dem Kohlendioxidanteil der Luft beziehen (ca. 3.3 kg CO₂ pro kg Naturkautschuk¹). Auch Erdöl besteht aus Kohlenwasserstoffen, aus einer Mischung unterschiedlich langer C-Kettenmoleküle.

Kautschuke sind unvernetzte Kettenmoleküle (Polymere), deren Kristallisationstemperaturen (<Glastemperatur>, weil sie dann <glashart> werden) unterhalb der Gebrauchstemperatur liegen, d.h. sie sind bei Zimmertemperatur weich. Werden sie erhitzt, wird die Masse ab der <Erweichungstemperatur> zähflüssig, und bei weiterer Erwärmung tritt schliesslich die Zersetzung ein. Solche Polymere werden *Thermoplaste* genannt und können bei höheren Temperaturen und/oder dem Einfluss von deformierenden Kräften formgebend verarbeitet werden.

Chemisch leicht vernetzte Kautschuke werden *Elastomere* (Gummi) genannt. Die wesentliche Eigenschaft von Elastomeren ist ihre ausgeprägte Kautschuk- oder Gummielastizität. Durch Zusatz verschiedenster Additiva (Weichmacher, Füllstoffe, Alterungsschutzmittel, etc.) werden die Verarbeitbarkeit und Mischbarkeit der Kautschuke verbessert, die Vernetzung gesteuert und insbesondere die Eigenschaften des Fertigproduktes stark beeinflusst.

Charles Goodyear gelang 1838 ein Verfahren, um Naturkautschuk härter und für Reifen <brauchbar> zu machen. Diese Vernetzungsreaktion – Vulkanisation genannt – erfolgt durch Erhitzen und durch Zugabe von Schwefel (bzw. S₂Cl₂) und einem Vulkanisationsaktivator (Zinkoxid, ZnO₂); zwischen den Kettenmolekülen bilden sich Schwefelbrücken (S–S–Brücken). Je stärker vernetzt wird, desto mehr Schwefel wird eingebaut und umso härter wird der Gummi. Derartig nicht weiter aufgearbeiteter Gummi <altert> nach einiger Zeit an der Luft, er wird bröckelig. Gummi muss daher mit Stabilisationschemikalien (Alterungsschutzmittel) beständig gemacht werden.

Füllstoffe tragen nicht nur zur Verbilligung von Kautschukmischungen bei, sondern wirken meist mehr oder weniger verstärkend auf den Kautschuk. Unter anderem werden Eigenschaften wie Festigkeit, Spannungswert und Einreisswiderstand erhöht, während andere Eigenschaften wie die Bruchdehnung erniedrigt werden. Die verstärkenden Füllstoffe werden auch als aktive Füllstoffe bezeichnet.

Neben den Füllstoffen kommt den Weichmachern in Kautschukmischungen mengenmässig die grösste Bedeutung zu.

Natur- und Synthesekautschuk

Die Naturkautschuk-Produktion erfolgt vornehmlich in Südostasien auf kleinbäuerlichen Betrieben. Thailand und Indonesien produzieren rund 80% der Weltproduktion von etwa 7'000'000 t pro Jahr. Ein Kautschukbaum produziert ca. 2 kg Naturkautschuk pro Jahr und kann 25 – 35 Jahre genutzt werden.

Durch Lieferengpässe beim Naturkautschuk ausgelöst, wurde 1911 vom Chemieunternehmen Bayer in Deutschland der erste Synthesekautschuk (SR für <synthetic rubber>) herge-

¹ Pré Consultants (2001), Life cycle assessment of an average European car tyre. BLIC, Brussels.

stellt. Die Ausgangsprodukte liefert die Petrochemie. Im Gegensatz zum Naturkautschuk enthält Synthesekautschuk «fossilen» Kohlenstoff.

In einem Reifen können mehr als 10 unterschiedliche Synthesekautschuke enthalten sein. Den dominierenden Anteil hat Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR). Weitere sind Butadien-Kautschuk (BR), Isopren-Kautschuk (IR), Butyl-Kautschuk (IIR) und chlorierter bzw. bromierter Butyl-Kautschuk (CIIR, BIIR). Synthesekautschuke sind chemisch reiner und einheitlicher und können hinsichtlich bestimmter Eigenschaften den Naturkautschuk übertreffen (z.B. Hitzebeständigkeit, Entflammbarkeit oder bessere Resistenz gegen Licht, Säuren oder Fette).

Die weltweite Jahresproduktion von Synthesekautschuk übertrifft jene des Naturkautschuks und liegt bei über 10'000'000 t; rund 60% des Synthesekautschuks geht in die Reifenproduktion.

Die weltweite Gummi-Produktion liegt im Bereich von 17 Mio. t.² Gemäss derselben Quelle liegt der Marktpreis in der EU für Naturkautschuk bei 750 Euro pro Tonne und jener für Synthesekautschuk bei 1'400 Euro pro Tonne.

Reifengummi

Damit ein Gummi die an ihn gestellte Aufgabe erfüllen kann, müssen der Kautschukmischung diverse Additive zugesetzt werden. Bei Reifen ist *Russ* der wichtigste Füllstoff. Russ erfüllt verschiedene Aufgaben und sorgt u.a. für eine verbesserte Verschleissbeständigkeit; ohne Russ würde der Reifen auch auf der Fahrbahn festkleben. In der Reifenherstellung werden 6 – 8 unterschiedliche Russqualitäten eingesetzt. Eine Teilmenge des Russes kann durch *Siliciumdioxid* (SiO₂) ersetzt sein, um den Reifen geräuscharmer zu machen und den Fahrwiderstand zu reduzieren. Um die natürliche Zersetzung von Kautschuk zu bremsen, werden Alterungsschutzmittel wie z.B. Antioxidantien und Chelatbildner zugemischt. Pigmente und Styrolharze sind weitere Füllstoffe. Nach den Füllstoffen kommt den Weichmachern in Kautschukmischungen mengenmässig die nächstgrösste Bedeutung zu.

4.2 Russherstellung

Der in der Reifengummi-Herstellung benötigte Russ ist nicht einfach «Russ» aus irgendeiner Verbrennung, sondern ein grosstechnisch hergestelltes Qualitätsprodukt, das genau spezifizierte physikalische, chemische und anwendungstechnische Eigenschaften aufweisen muss. Auch im Reifengummi werden nur genau spezifizierte Russqualitäten eingesetzt. Etwa 93% der Weltrussproduktion wird von der Gummiindustrie verwertet und davon rund 75% in der Reifenindustrie. Industrieruss wird durch kontrollierte Pyrolyse oder im Aerosolverfahren in einem Russreaktor durch unvollständige Verbrennung von Kohlenwasserstoffen erzeugt. Beim Furnace-Verfahren wird ein Öl-Gas-Gemisch in einen Flammenreaktor eingeblasen und auf 1200 – 2200°C erhitzt, um dann mit eingesprühten Wassertröpfchen als Kondensationskeimen feinste Russpartikelchen zu erzeugen³. Der Kohlenstoff des Russes ist also fossilen Ursprungs.

Weil die Reifenherstellung den grössten Russbedarf aufweist, wäre es sehr sinnvoll zu versuchen, den Russ aus den Altreifen jeweils wieder zurückzugewinnen und in die Reifenherstellung zurückzuführen.

² siehe: Watson Brown HSM Ltd (November 2001), Novel concepts in environmentally friendly rubber recycling.

³ www.degussa-fp.com/de/gesch/gummiru/herstellung.html

4.3 Chemische Beschaffenheit von Reifen

Die genaue chemische Zusammensetzung von Reifen variiert von Hersteller zu Hersteller. Die Mixturen sind selbstverständlich Firmengeheimnisse. Auch PW- und LW-Reifen unterscheiden sich wegen der unterschiedlichen Beanspruchungen und Einsatzbereiche substantiell. Aus diesen Gründen kann keine genaue chemische Zusammensetzung von Reifen angegeben werden. Nachfolgend einige Angaben, die den groben Rahmen aufzeigen.

Tab.1: Chemische Zusammensetzung von Reifen

	UBA Berlin (1997) ^a		BUWAL (1997) ^b	BUWAL (2001) ^c
Kohlenstoff (C)	70 %	700 g/kg		70 %
Eisen (Fe)	16 %	160 g/kg		16 %
Wasserstoff (H)	6 %	60 g/kg		7 %
Sauerstoff (O)	3 %	30 g/kg		4 %
Schwefel (S)	1.5 %	15 g/kg		1 %
Zink (Zn)	1.5 %	15 g/kg	ca. 3 g/kg	1 %
Silizium (Si)	1 %	10 g/kg		
Stickstoff (N)	0.5 %	5 g/kg		0.5 %
Chlor (Cl)	0.075 %	0.75 g/kg		
Brom (Br)	0.075 %	0.75 g/kg		
<i>Summe</i>	99.65 %	996.5 g/kg		
Magnesium (Mn)	750 ppm	750 mg/kg		
Kupfer (Cu)	450 ppm	450 mg/kg	ca. 65 mg/kg	
Blei (Pb)	410 ppm	410 mg/kg		
Kobalt (Co)	250 ppm	250 mg/kg		
Chrom (Cr)	97 ppm	97 mg/kg	11 – 97 mg/kg	
Nickel (Ni)	77 ppm	77 mg/kg	17 – 77 mg/kg	
Arsen (As)	20 ppm	20 mg/kg		
Zinn (Sn)	10 ppm	10 mg/kg		
Cadmium (Cd)	8 ppm	8 mg/kg	0.1 – 10 mg/kg	
Vanadium (V)	5 ppm	5 mg/kg		
Antimon (Sb)	0.7 ppm	0.7 mg/kg		
Thallium (Tl)	0.25 ppm	0.25 mg/kg	0.2 – 0.3 mg/kg	
Quecksilber (Hg)	0.17 ppm	0.17 mg/kg	3 – 760 mg/kg	
<i>Summe</i>		2078.12 mg/kg		

^a ifeu (1997), Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft – Fallbeispiel Verwertung von Altreifen. In: UBA-Text 10/99, Berlin

^b BUWAL (1997), Abfallentsorgung in Zementwerken – Thesenpapier. Umwelt-Materialien Nr. 70

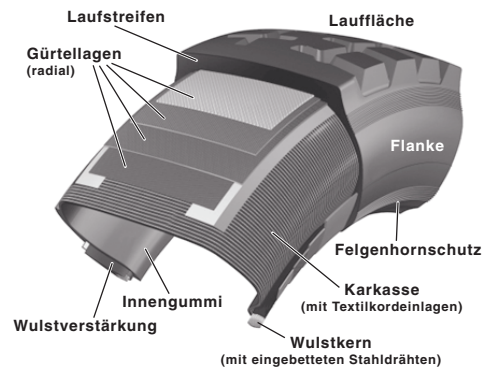
^c BUWAL (2001), Merkblatt Altreifen. Angaben für PW-Reifen. BUWAL-Homepage: Abfall, Altreifen

4.4 Reifenaufbau

Ein Reifen muss verschiedensten Ansprüchen genügen. Daher besteht er aus verschiedenen Teilen, die jeweils für ihre Aufgabe optimiert sind. Dementsprechend unterschiedlich ist auch die Gummi- und sonstige chemische Zusammensetzung dieser Reifenteile. Lichtbeständigkeit, Abriebfestigkeit, Luftundurchlässigkeit, Elastizität, Reissfestigkeit und chemische Widerstandsfähigkeit sind einige der Anforderungen.

Der Grundkörper eines Reifens nennt sich *«Karkasse»*, auf die der *Laufstreifen* aufgebracht wird. Die Karkasse gibt dem Reifen die notwendige Festigkeit. Die Karkasse besteht heutzutage aus gummibeschichteten Kunstfasern aus Rayon oder Nylon. Die Gürtellagen enthalten neben Kunstgewebe auch Stahldrähte: bei PW-Reifen ist dieser Anteil gering, bei LW-Reifen hoch. Der Reifenwulst ist für den guten Sitz des Reifens auf der Felge verantwortlich, sowie bei schlauchlosen Reifen auch für die Luftdichtigkeit. Der Wulstkern besteht aus gummibeschichteten *Stahldrähten*.

Abb.1: Reifenaufbau



Tab.2: Stoffliche Zusammensetzung von Reifen (in Gew.-%)

	PW ^a	Lieferwagen ^a	LW ^a	Gesamt- durchschnitt ^a	PW ^b BLIC-Studie	PW ^c BUWAL
Naturkautschuk	21	19	31	24	18.4	47.0
Synthesekautschuk	24	23	14	21	25.4	(Natur + Synthese)
Russ, SiO ₂	28	26	21	26	28.7	21.5
Stahldrähte	12	18	24	16	11.4	16.5
Gewebe	4	4	1	3	4.7	5.5
Öle, weitere Zuschlagstoffe	11	10	9	10	11.4	9.5
Summe	100	100	100	100	100	100

PW = Personenwagen, LW = Lastwagen

^a ifeu (1997), Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft – Fallbeispiel Verwertung von Altreifen. In: UBA-Text 10/99, Berlin

^b Pré Consultants (2001), Life cycle assessment of an average European car tyre. BLIC, Brussels

^c BUWAL (2001), Merkblatt Altreifen. BUWAL-Homepage, Abfall, Altreifen

Ein Reifen enthält so um 30 verschiedene Synthesekautschuke, etwa 8 Typen von Naturkautschuk, ca. 8 Qualitäten von Industrieruss, dann Stahl und Textilgewebe sowie etwa 40 weitere Substanzen wie Wachse, Öle, Pigmente, Antioxidantien, etc.

5 ALTREIFENENTSORGUNG

5.1 Altreifenaufkommen und Entsorgungswege im Vgl. zum Ausland

Der schweizerische Reifenmarkt ist nicht ganz erfasst, u.a. weil der Import von Reifen auf Fahrzeugen nicht speziell registriert wird und (Alt-)Reifen bisher keine kontrollpflichtigen Abfälle waren. Die nachfolgend genannten Zahlen sind daher nicht exakt.

Tab.3: Schweizerischer Reifenmarkt 2001 (in 1'000 Stück)⁴

Deutschland im Jahre 2000

Absatz PW-Sommerreifen	2'030		
Absatz PW-Winterreifen	2'590		
Import auf Neuwagen	1'575		
<i>Summe</i>		6'195	71'600
Absatz Lieferwagenreifen	350		
Absatz LW-Reifen	150		
Import auf Nutzfahrzeugen	180		
<i>Summe</i>		680	8'100
Gesamtanzahl (in 1'000 Stück)		6'875	79'700

Tab.4: Altreifenverwertung in der Schweiz⁵

Deutschland

Gesamtmenge	~ 50'000 t	~ 600'000 t
Runderneuerung	~ 7%	
Zementwerke	~ 40%	
KVAs	~ 4%	
Export ins Ausland	~ 43%	
Verbleib unbekannt	~ 6%	

Das weltweite Altreifenaufkommen wird auf 10 Mio. Tonnen pro Jahr geschätzt, mittelfristig muss mit 17 Mio. Tonnen pro Jahr gerechnet werden (derzeitige Weltproduktion an Reifengummi).

⁴ Angaben Reifenverband der Schweiz RVS und Automobilrevue 32, 2002 (August), S. 13

⁵ Altreifen-Merkblatt, BUWAL-Homepage: Abfälle, Altreifen / abgeändert gemäss pers. Mitt. Beat Frey BUWAL

Tab.5: Altreifenverwertung in Europa & USA

Gesamtmenge	Deutschland ⁶		EU ⁷	USA ⁸	PW-Pneu EU ⁹
	600'000 t	nur Entsorg. ^a 480'000 t	nur Entsorg. ^a 2'263'000 t	nur Entsorg. ^a 2'410'000 t	nur Entsorg. ^a k.A.
Weiterverwendung	15'000 t 2.5 %	—	k.A.	k.A.	k.A.
Runderneuerung	105'000 t 17.5 %	—	k.A.	k.A.	k.A.
Zementwerke	210'000 t 35.0 %	43.8 %	22 %	40 %	25 %
Kraftwerke/Heizwerke	35'000 t 5.8 %	7.3 %			3 %
Gummi-Verwertung ^b	100'000 t 16.7 %	20.8 %	20 %	16 %	25 %
Deponie	8'000 t 1.3 %	1.7 %	46 %	38 %	27 %
Export ^c	90'000 t 15.0 %	18.7 %	12 %	6 %	20 %
unbekannt	37'000 t 6.2 %	7.7 %			
	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

^a um die Angaben zu Deutschland mit anderen Studien etwas vergleichbar zu machen, wurden die deutschen Angaben umgerechnet

^b Gummi-Shredder, Gummi-Mehl, Einbau in Baumaterialien (z.B. Strassenbau), Verwendung ganzer Reifenstücke (z.B. in Landwirtschaft), etc.

^c Verwertungsart exportierter Reifen ist unbekannt, z.T. Weiterverwendung, z.T. in wilde Deponie, z.T. Verbrennung,...

k.A. keine Angaben

Reifengummi besteht zum grossen Teil aus Kohlenwasserstoffen, hat einen hohen Brennwert und verbrennt fast komplett zu CO₂ und H₂O. Da Naturkautschuk kein Erdölprodukt sondern ein pflanzlicher Rohstoff ist, sind in etwa 25% des Kohlenstoffs eines Reifens «bio-gen», d.h. nicht fossil. Die Verbrennung von Reifen hat deshalb eine bessere CO₂-Bilanz als die Verbrennung von Heizöl.

Tab.6: Heiz- bzw. Brennwerte verschiedener Brennstoffe

Methan	~ 50'000 kJ/kg	(35'900 kJ/m ³)
Benzin	~ 43500 kJ/kg	
Heizöl extra leicht	~ 43000 kJ/kg	
Erdgas	~ 40'400 kJ/kg	
Erdöl	~ 40'000 kJ/kg	
Altöl	~ 39'500 kJ/kg	
Altreifen	~ 29'500 kJ/kg	
Steinkohle	~ 29'400 kJ/kg	
Altholz	~ 17'000 kJ/kg	
Altpapier	~ 17'000 kJ/kg	
Siedlungsmüll	~ 12'000 kJ/kg	
1 kWh	3'600 kJ	

⁶ ifeu (1997), Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft – Fallbeispiel: Verwertung von Altreifen. UBA Berlin, Text 10/99

⁷ Reschner K. (2002). http://home.snafu.de/kurtr/str/de_prod.html

⁸ Reschner K. (2002). http://home.snafu.de/kurtr/str/de_prod.html

⁹ Pré Consultants (2001), Life cycle assessment of an average European car tyre. BLIC, Brussels.

5.2 Varianten der Altreifenverwertung und -entsorgung

Zwei gute Übersichten, wie Altreifen verwertet bzw. entsorgt werden (können), finden sich im Internet^{10,11}. Deshalb soll nachfolgend nur eine zusammenfassende Übersicht gegeben werden.

Verwertungsmöglichkeiten von Altreifen – Übersicht

Weiterverwendung <i>Occasionsreifen & Export</i> <i>Nachschneiden Reifenprofil</i> <i>Zweckentfremdung</i>	Weiterverwendung im In- oder Ausland als Gebrauchtreifen Weiterverwendung im In- oder Ausland als Gebrauchtreifen Verwendung von Reifen als Schuhsohle, als Prallschutz (z.B. Boote), zur Beschwerung von Plastikabdeckungen in der Landwirtschaft, etc. Aufbau der Drainageschicht in Deponien aus ganzen Altreifen ¹²
Runderneuerung <i>Heiss- oder Kaltrunderneuerung</i>	Die Karkasse wird weiter verwendet und nur ein neuer Laufstreifen aufgummiert. Runderneuerung findet v.a. bei LW-Reifen statt und ist bis zu 4x möglich. Runderneuerte PW-Reifen sind wenig beliebt, haben ein Imageproblem, obwohl die Qualitätskontrolle durch die Gütegemeinschaft Reifenerneuerung GRE sichergestellt ist (siehe VCS-Autoumweltliste 2003, S. 43).
Wertstoffliche Verwertung <i>Shredder, Granulate & Mehle</i> Verwertung Recyclat	Altreifengummi wird in Stücke zerlegt und dann in feine Körnchen zermahlen. Fremdstoffe wie Stahl und Textil werden entfernt und teilw. recycelt. Im Kaltmahlverfahren wird der Reifen mit flüssigem Stickstoff auf -100°C gefroren. In Deutschland gibt es Granulierwerke für eine Jahreskapazität von gegen 100'000 t. Je feiner das Gummimehl, desto grösser der Aufbereitungsaufwand aber desto besser die Marktchancen. Verwertung durch Pyrolyse: Pyrolysegas/-öl, Energieproduktion und Russ Zusatz in Neureifen-Gummimischungen (2% sind unproblematisch, bis 20% sollen heute schon möglich sein): Das Problem ist eine gute Vulkanisation der recycelten Gummikörnchen, das eine vorgängige Devulkanisation («Reaktivierung») notwendig macht, die schwierig ist. Zusatz in anderen Gummi-Produkten: (Sport-)Bodenbeläge, Gummimatten, Lärmschutzmaterialien, etc. Zumischung bis 5%. Zumischung in Asphalt: «Flüsterbelag» im Strassenbau; erhöht die Lebenserwartung des Strassenbelags u.U. erheblich (bis Verdoppelung) und reduziert auch Fahrgeräusche. Verbreitet in USA und Schweden (5% Zumischung in der Deckschicht des Strassenbelags), am Aufkommen in UK. In der Schweiz max. 2% Zumischung erlaubt. Garten- und Landschaftsbau: 10 – 15% Gummigranulat-Zumischung in den Boden verhindert eine Kompaktierung stark frequentierter Rasenflächen (z.B. Sportstadien). Granulat kann eine hohe Kapillarwirkung für Öl-Wasser-Gemische haben und als Öl-Bindemittel eingesetzt werden. Das vollgesogene Granulat kann dann thermisch verwertet werden.
Rohstoffliche Verwertung <i>Pyrolyse</i>	Ganze oder geshredderte Reifen werden unter Luftabschluss auf ca. 600°C erhitzt. Der Reifen schmilzt und zersetzt sich. Es entstehen Pyrolysegas, Pyrolyseöl und ein fester Rückstand aus Pyrolysekoks (Kohlenstoff + Verunreinigungen) und Stahlschrott. Die Qualität der Pyrolyseprodukte hängt stark von den Pyrolysebedingungen ab (z.B. Vakuumpyrolyse). Pyrolysegas/-öl kann direkt verbrannt (Wärme- oder Stromproduktion) oder in Kondensationssystemen zu marktfähigen Produkten aufbereitet werden (Rektifikation). Das Pyrolysekoks kann zu vermarktbarem Russ oder gar zu Aktivkohle aufbereitet werden (je nach Pyrolyseart). Die Stahlfraction sollte besser vor der Pyrolyse separiert werden, weil sie im Pyrolyseprozess zu sehr zersetzt wird, um zu einem vermarktbaren Pro-

¹⁰ LfU Baden-Württemberg (2002), Entsorgung von Altreifen in Baden-Württemberg – Situationsbericht. www.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/altreifen/gesambroschuere.pdf

¹¹ Reschner K. (2002). http://home.snafu.de/kurtr/str/de_prod.html

¹² siehe: www.tyredisposal.co.uk/disposal_routes.asp

	dukt aufbereitet werden zu können. In Miltzow (Deutschland) ist eine Pyrolyseanlage mit Drehrohrreaktor im Bau, die dereinst 60'000 t Altreifen pro Jahr verwerten können soll. Auch in UK sind zwei Pyrolyseanlagen in der selben Grösse geplant¹³. Das Jura-Cement-Werk in Wildegg hat eine Pyrolyse-Vorbehandlungsanlage; die festen Pyrolyse-Rückstände werden der Zementherstellung zugemischt und das Pyrolysegas/-öl direkt verheizt.
Hochtemperaturvergasung	Ähnlich der Pyrolyse, jedoch Aufheizen auf 1200 – 1400°C und anschliessend schockartiges Abkühlen. Pilotanlagen funktionierten. Keine gross-technische Anlage bekannt.
Mikrowellen-Entvulkanisation	Zersetzung des Gummis mittels Mikrowellen in Russ und Produktgas/-öl. Siehe EWV-Verfahren, Szenario 2.
Hydrierung	Gummimehl wird unter Hochdruck (300 bar) bei 400°C verflüssigt und durch Anlagerung von Wasserstoff in unvernetzte Kohlenwasserstoffe zerlegt. Das Produkt ist ein synthetisches Rohöl, das einem Raffinerieprozess zugeführt und aufbereitet werden kann.
Mechanische Entvulkanisation	Aufbrechen der Vernetzung (Schwefelbrücken) durch starke mechanische Bearbeitung des Gummis (gegeneinander laufende Walzen oder Schneckenextruder). Die Technologie soll vielversprechend sein, muss aber noch weiter optimiert werden. Ähnliche Wirkung hat die Gummi-Bearbeitung mit Ultraschall.
Biologischer Abbau	Gummi kann mikrobiell mit speziellen Bakterien, die die Schwefelbrücken angreifen, zersetzt werden. Das Problem sind aber die Zuschlagstoffe im Reifengummi, die die Bakterien abtöten. Ein neuer Ansatz ist deshalb der, den Altreifengummi zunächst mit speziellen Pilzen zu detoxifizieren, um ihn dann diesen Bakterien vorzulegen. Das Verfahren ist noch in der wissenschaftlichen Erprobungsphase und noch nicht praxistauglich.
Energetische Verwertung	
Kraft- & Heizwerke	Energetische Verwertung von Reifen oder Reifen-Shredder zur Wärme- oder Stromproduktion. In der Schweiz ohne Bedeutung.
Zementindustrie	Energetische und stoffliche Verwertung von Reifen oder Reifen-Shredder als sekundärer Brennstoff und Zuschlagstoff bei der Zementherstellung. Das Zementwerk braucht eine dafür geeignete Infrastruktur. In UK wird dieser Verwertungsweg favorisiert und stark gefördert (da BPEO), obwohl Umwelt-NGOs stark opponieren (wegen negativem Image von Zement- und Verbrennungsanlagen und deren Emissionen). Die UTWG geht davon aus, dass bis 2006 sämtliche Altreifen auf diesem Weg entsorgt werden könnten.¹⁴
Beseitigung	
Deponierung	In der Schweiz gilt seit 1.1.2000 ein Deponieverbot für brennbare Abfälle, zu denen auch Altreifen zählen. Das Deponieren von Altreifen ist auch in Deutschland kaum mehr möglich. EU-Recht verbietet die Altreifenentsorgung in Deponien ab Juli 2006.

Trends im internationalen Vergleich

Unter den verschiedenen Varianten der Altreifenverwertung dominiert im internationalen Bereich die thermische Verwertung, insbesondere jene in Zementwerken. In den USA hat man seit Jahren voll auf diese Schiene gesetzt, ebenso in England. Neuerdings überdenkt man dort diese Politik wieder.

Die stoffliche Verwertung von Altreifen ist generell schlecht etabliert. Hier dominiert die Gummimehl- und Granulatherstellung. In den USA werden Gummigranulate weit verbreitet in Asphaltbeläge¹⁵ oder auch im Baubereich¹⁶ eingesetzt, da Studien belegen, dass Gummishredder keine negativen Umweltauswirkungen haben soll¹⁷. In der Schweiz ist man da we-

¹³ siehe: Department of Trade and Industry UK (2000), Tyre Recycling – Factsheet.

¹⁴ siehe: Department of Trade and Industry UK (2000), Tyre Recycling – Factsheet.

¹⁵ siehe: www.rubberpavements.org/ und www.rma.org/

¹⁶ NEWMOA, USA (2001), Beneficial use of tire shreds as lightweight fill for embankments and retaining walls – Factsheet.

¹⁷ siehe: Humphrey D.N. & L.E. Katz, 2001a+b

sentlich zurückhaltender. Das Altreifen-Merkblatt des BUWAL¹⁸ hält fest: «Der Einsatz von Altreifen in Bereiche, die mineralischen Materialien vorbehalten sind, erschwert deren spätere Entsorgung. Auf eine Verwertung von Altreifengranulat in Beton, Formsteinen, Strassenbelägen u.a. ist daher zu verzichten, ausgenommen bleiben Spezialfälle aufgrund technischer Notwendigkeiten.» In Asphalt-Flüsterbelägen darf der Gummianteil maximal 2% betragen.

Bei der rohstofflichen Verwertung gilt es hohe technische und finanzielle Hürden zu nehmen. Hier dominieren verschiedene Pyrolyse-Verfahren. Leider ist die Weiterentwicklung und grossindustrielle Umsetzung solcher Verfahren finanziell (noch) wenig attraktiv, weil die Rohstoffpreise, vielerorts auch (noch) die Deponiepreise und die Abnahmepreise der Zementindustrie zu günstig sind. Das dürfte sich aber langsam ändern, weil in einer wachsenden Zahl von Ländern Altreifen nicht mehr deponiert werden dürfen (EU-Verbot ab 2006) und vermehrt auf Recycling gesetzt wird (z.B. EU-Altauto-Richtlinie). So erstaunt es nicht, dass in den verschiedenen Industriestaaten grosstechnische Recyclinganlagen in Planung oder im Bau sind.

Der Hauptfokus dieses Berichts ist aufzuzeigen, wie Altreifen derzeit im In- und Ausland verwertet werden und wie ein ökologischerer Weg allenfalls aussehen könnte. Zu diesem Zweck werden nachfolgend zwei Entsorgungswege beispielhaft näher betrachtet: Die etablierte Verwertung in Zementwerken und das ganz neue Microwellen-Recycling-Verfahren (<reverse polymerization>) der kanadischen Firma EWI.

¹⁸ Altreifen-Merkblatt, BUWAL-Homepage: Abfälle, Altreifen

SZENARIO 1:

ALTREIFENVERWERTUNG IN ZEMENTWERKEN

6 ZEMENTHERSTELLUNG

Zement ist ein sehr beliebter Baustoff. 2001 wurden weltweit 1'687 Mio. t davon hergestellt, ein Drittel davon allein in China.

Zement ist ein mineralisches, hydraulisches Bindemittel. Unter Wasseraufnahme erhärtet er an der Luft oder unter Wasser durch eine chemische Reaktion zu einem steinartigen Material. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Zementarten, die sich in der Zusammensetzung leicht unterscheiden und sich durch unterschiedliche Eigenschaften auszeichnen. Beton ist ein Gemenge von Zement mit grobkörnigen Zuschlagstoffen wie Sand, das zunächst breiig angerührt wird, in Form gegossen werden kann und dann nach einer gewissen Zeit abbindet und steinhart wird.

6.1 Klinkerbrennprozess

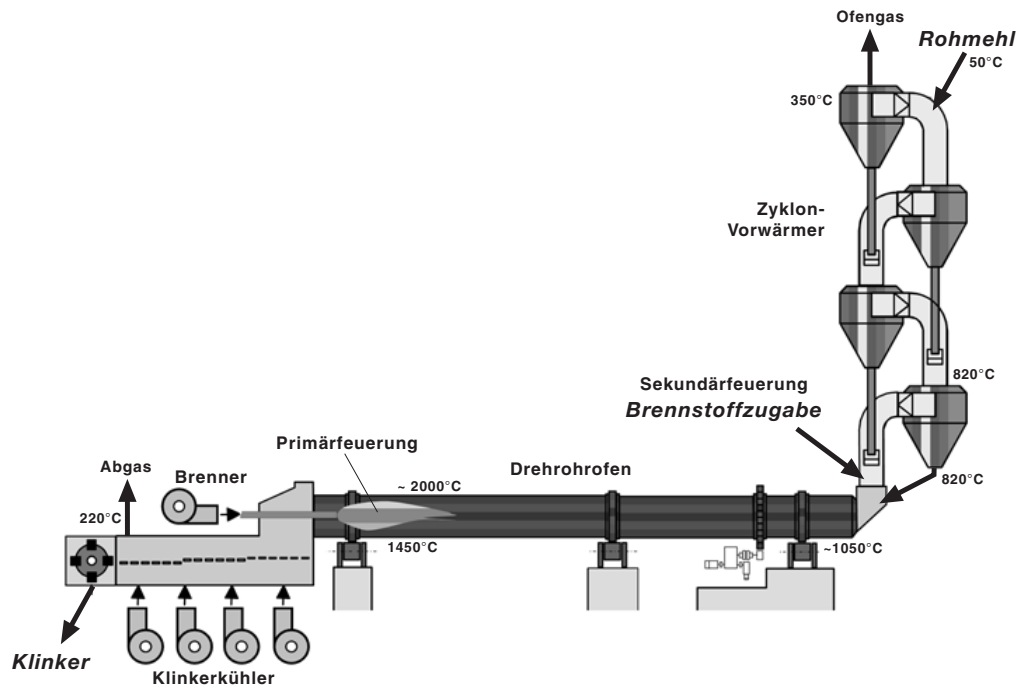
Die Ausgangsstoffe für Zement sind Rohminerale, die in Kalksteinbrüchen gewonnen werden und allenfalls durch Zuführen weiterer Rohstoffe ergänzt werden müssen. Diese Ausgangsstoffe sind Kalkstein, Kreide, Ton oder Mergel und eventuell kleine Mengen Quarzsand und Eisenerz. In etwa 70% CaCO_3 (Kalk), 20% SiO_2 (Kieselsäure) und 10% Al_2O_3 (Tonerde), Fe_2O_3 (Eisenoxid) und weitere Spurenminerale werden benötigt. Diese Rohstoffe werden in genau festgelegtem Verhältnis in Brechern und Mühlen zu einem homogenen staubförmigen Rohmehl gemahlen.

Das Rohmehl wird in Stufen über Vorwärmer aufgeheizt (und getrocknet). Im Drehofen wird das Mehl weiter erhitzt und bei schliesslich 1450°C gesintert, d.h. zu etwa nussgrossen Klumpen verbacken. Dieser sogenannte Portland-Zementklinker (PZ-Klinker), der am Ende des Drehrohrs austritt (um 1200°C heiss), muss dann relativ rasch auf $100 - 300^\circ\text{C}$ abgekühlt werden (Luftkühlung). Der Drehofen wird durch einen Brenner am Ende des Drehrohrs (Primärfeuerung) und durch Sekundärbrennstoffe, die am «kalten» Ende zugesetzt werden, beheizt. Bei der Sinterung entstehen bestimmte Mineralphasen; die wichtigste ist das Tricalciumsilikat ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$), «Alit» genannt (C_3S). «Belit» ist C_2S (Dicalciumsilikat) und die «Aluminatphase» C_3A (Calciumaluminat = $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$).

Durch das Mahlen des PZ-Klinkers und Zumischen von Zumahlstoffen entsteht dann der eigentliche «Zement», der mit Sand und Wasser vermischt zu «Beton» oder Mörtel wird. Je nach den Zumahlstoffen hat der Zement die Eigenschaften, die ihn charakterisieren. Am wichtigsten ist der Portlandzement (PZ-Zement), der ca. 5% Gips (CaSO_4) als wichtigsten Zumahlstoff enthält.

Der beschriebene Prozess der Zementherstellung ist stark generalisiert dargestellt. Tatsächlich gibt es viele verschiedene *technische* Methoden der Klinkerherstellung, es gibt auch veraltete und moderne (optimierte) Prozessabläufe (insbesondere auch bezüglich der Energierückgewinnung). Die Klinkerherstellung erfolgt heute überwiegend nach dem Trocken- und teilweise auch nach dem Halbtrockenverfahren (Wassergehalt 10 – 12%). Im Trockenverfahren (siehe Schema unten) wird das Rohmehl stetig aufgewärmt und gelangt dann trocken in den Drehofen. Je nach Verfahren ist der Drehofen kurz (50 – 70 m) oder lang (bis über 200 m). Es gibt verschiedene Arten des Vorwärmens des Rohmehls; heute werden meist Zyklonvorwärmer verwendet (Verwirbelung des Rohmehlstaubs im aufsteigenden Abgas des Drehofens über mehrere Stufen). Die Primärfeuerung erfolgt durch Einblasen eines Luft-Brennstoff-Gemisches. Die Primärbrennstoffe sind vorwiegend Kohlestaub und Heizöl. Der Drehofen rotiert mit 0.5 – 4.5 Umdrehungen pro Minute und hat ein Gefälle von 2.5 – 4.5% (damit das Brenngut langsam transportiert wird); die Durchlaufzeit durch den Drehofen beträgt 20 – 30 Minuten (kurzer Ofen). Es gibt auch diverse Möglichkeiten der Stoff- bzw. Abgasrückführung z.B. über einen «Bypass». Schliesslich ist auch der Elektrofiter zu nennen, der die Staubpartikelemissionen vor dem Abluftkamin reduziert.

Abb.2: Klinkerherstellung im Trockenverfahren



6.2 Materialbilanz der Klinkerherstellung

Überschlagsmässig werden in Europa 1.55 t Rohstoffe für die Herstellung von 1 t Zementklinker benötigt. An Energie muss 0.13 t Steinkohle oder 87 kg Heizöl (~ 3770 MJ) zugeführt werden. Der Prozess insgesamt setzt dann in etwa 0.86 t CO₂ frei. Werden der 1 t Klinker noch 0.05 t Gips und 0.12 t mineralische Zuschlagstoffe (z.B. Kalkstein) zugesetzt und alles gut gemahlen und gemischt, ergibt das 1.17 t Zement (entspricht einem <Klinkerfaktor> von 85%). Es gibt auch (ausländische) Zemente mit einem Klinkerfaktor von 80% oder tiefer, d.h. dort werden 0.2 t Zuschlagstoffe oder mehr zugegeben. Diese Materialbilanz kann – je nach Zementregion – recht unterschiedlich ausfallen und weicht auch von den schweizerischen Werten etwas ab (siehe unten).

6.3 Energiebedarf der Klinkerherstellung

Die Zementherstellung verbraucht viel Energie: zur Sinterung werden schliesslich rund 1450°C benötigt. Das Rohmehl wird in Vorwärmern aufgeheizt. Bis etwa 200°C wird das ungebundene Wasser ausgetrieben (Trocknungsprozess). Im Temperaturbereich zwischen 100 – 400°C geben die Tonminerale das adsorptiv gebundene Wasser ab. Und zwischen 400 – 750°C wird das chemisch gebundene Wasser ausgetrieben (Dehydratation). Das im Zementrohmeal enthaltene CaCO₃ beginnt sich ab etwa 600°C in CaO + CO₂ zu zersetzen; dieser Prozess, der richtig bei 850° einsetzt, wird als <Entsäuerung> bzw. (<Calcinierung>) bezeichnet. Beim Eintritt in den Drehofen hat das Rohmehl eine Temperatur von ca. 1000°C.

Die Primärfeuerung ist ein Brenner am Ende des Drehrohrs, dessen Flamme gegen die Materialflussrichtung feuert und die heissen Ofengase Richtung Ofeneingang bläst. Die Flamme ist ca. 2000°C heiss. So entsteht ein Temperaturgradient im Drehofen von etwa 1000°C bis 1500°C am Ende des Drehrohrs. Gewisse Abfallbrennstoffe eignen sich, um in den Brennstoffmix der Primärfeuerung eingespeist zu werden.

Viele Zementwerke verfügen auch über eine Sekundärfeuerung. Am Einlauf des Drehrohrföfens oder im Vorwärmer können weitere Brennstoffe eingespeist werden, die den Energie-

bedarf der Primärfeuerung senken. Je nach Bauart können unterschiedliche Sekundärbrennstoffe «entsorgt» werden, wie z.B. ganze Altreifen (ohne Felgen). Die Reifen werden komplett verbrannt bzw. zersetzt – inkl. dem Stahlanteil – und gehen auf in Energie, Abgasen und «Zuschlagstoffen» des Klinkers (z.B. der Zink- und Stahlanteil).

Tab.7: Energieverbrauch aller schweizerischen Zementwerke¹⁹

	2000	2001
Kohle, Koks, Petrokoks	206'800 t	207'700 t
Heizöle	41'600 t	32'700 t
Gas	1.2 Mio. m ³	0.92 Mio. m ³
Alternativbrennstoffe	167'600 t	206'100 t
Elektrizität	371 Mio. kWh	382 Mio. kWh
Treibstoffe	2'958 t	3'015 t
Total Energieverbrauch	12.6 Mio. GJ/a	13.1 Mio. GJ/a
«klassische» Brennstoffe	63.6 %	58.3 %
Alternativbrennstoffe («Abfall»)	36.4 %	41.7 %
Jahresproduktion Klinker Schweiz	3'315'000 t	3'370'000 t

Tab.8: Energieverbrauch aller deutschen Zementwerke²⁰

	1999 Mio. GJ/a	2000 Mio. GJ/a	2001 Mio. GJ/a	prozentual
Steinkohle	29.4	31.4	21.8	34.8
Braunkohle	32.1	30.1	28.0	44.7
Petrolkoks	9.7	8.4	7.6	12.1
Heizöl schwer	5.9	1.9	3.4	5.4
Heizöl extraleicht	0.3	0.3	0.3	0.5
Erdgas und andere Gase	0.6	0.7	0.4	0.6
sonstige fossile Brennstoffe	0.9	1.0	1.1	1.8
(fossile) Primärbrennstoffe insgesamt	78.9	73.8	62.6	100.0
Sekundärbrennstoffe insgesamt	23.4	25.5	27.2	
thermischer Energieeinsatz insgesamt	102.3	99.3	89.8	
Jahresproduktion Klinker Deutschland	27'739'000 t	27'674'000 t	24'523'000 t	

Energiebilanz der Zementherstellung

Unter Berücksichtigung der Trocknung beträgt der Energiebedarf theoretisch ca. 2500 MJ pro Tonne Klinker. Die Reaktionsenthalpien der Klinkerherstellung liegen im Bereich von 1630 – 1840 MJ/t Klinker. Der tatsächliche Energiebedarf (thermische + elektrische) lag

¹⁹ cemsuisse (2002), Kennzahlen 2001. Bern.

²⁰ Verein Deutscher Zementwerke (2002), Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2001.

2001 bei den schweizerischen Zementwerken bei ca. 3470 MJ/t Klinker²¹. Zementwerke mit veralteter Technologie verbrauchen 5500 MJ oder gar mehr pro Tonne Klinker.

6.4 Stofftransporte

Zementwerke emittieren in grossen Mengen Kohlendioxid, Schwefeldioxid und Stickoxide. Das Kohlendioxid stammt einerseits aus dem Rohmaterial und andererseits aus den Brennstoffen der Ofenfeuerung. Die Stickoxide entstehen in chemischen Prozessen im Drehofen aus dem Stickstoff der eingeblasenen Luft. Das Schwefeldioxid stammt hauptsächlich aus dem mit dem Rohmaterial eingebrachten mineralischen Schwefelanteil (z.B. Pyrit). Detailliertere Angaben zu den Emissionen von Zementwerken folgen weiter unten.

Der Schwefel in den Brennstoffen (nicht jener im Rohmaterial), die Mineralelemente Aluminium, Silizium, Calcium und Eisen aus dem Rohmaterial und die schwerflüchtigen Metalle Chrom, Kupfer, Zink, Blei, Nickel, Arsen etc. werden hauptsächlich in den Klinker eingebaut. Halbflüchtige Metalle wie Thallium und teilweise auch Quecksilber und Cadmium gelangen in erster Linie in den Filterstaub, der dann wieder in den Klinkerherstellungsprozess rückgeführt wird; der *nicht* abgefilterte emittierte Staub transportiert die Schwermetalle in die Umwelt. Quecksilber, Stickoxide und der Schwefel aus dem Rohmehl gelangen hauptsächlich in die Abluft und dann – je nach der Effizienz der Rauchgasreinigung – in die Umwelt.

²¹ cemsuisse (2002), Kennzahlen 2001. Bern.

7 VERBRENNUNG VON ABFALL IN ZEMENTFABRIKEN

7.1 Konzepte und Strategien des Bundes

Grundsätzlich können Abfälle auf unterschiedliche Weise als Ersatzbrennstoffe in der Klinkerherstellung eingesetzt werden, wenn die dafür notwendige Infrastruktur im betreffenden Zementwerk vorhanden ist:²²

- a) Primärfeuerung: Flüssig oder fein gemahlen kann der sekundäre Brennstoff in die Brennerflamme am Ende des Drehofens eingedüst werden.
- b) Synthesegas durch Pyrolyse: Der Abfall wird in einem vorgeschalteten pyrolytischen Prozess vergast. Das thermochemische Synthesegas kann in der Primär- oder Sekundärfeuerung eingesetzt werden.
- c) Sekundärfeuerung: Der Abfall wird als Brennstoff am «kalten» Ende des Drehofens eingebracht. Ein Vorteil davon ist, dass der Abfall zuvor nicht gemahlen werden braucht. Z.B. können ganze Altreifen unzerkleinert eingeworfen werden.

Gemäss der selben Publikation hat die Verbrennung von Abfall in Zementöfen gegenüber jener in Kehrrechtverbrennungsanlagen KVA folgende Vorteile:

- geeignete Sekundärbrennstoffe substituieren fossile Brennstoffe
- Sekundärbrennstoffe aus nachwachsenden Biomasse-Produkten haben eine neutrale CO₂-Bilanz.
- Zementwerke besitzen einen besseren thermischen Wirkungsgrad als KVAs.
- Zementöfen erreichen eine höhere Temperatur als KVAs (letzte 800 – 900°C).
- In KVAs fällt Schlacke an, die entsorgt werden muss (ebenso Abwasser). In Zementwerken wird die anfallende Asche bei der Sinterung in den Klinker eingebaut, d.h. die Sekundärbrennstoffe sind gleichzeitig auch Sekundärrohstoffe. So substituiert beispielsweise der Stahl im Altreifen teilweise Eisenerz (Fe₂O₃), das ansonsten via Rohmaterial zugesetzt werden muss.

Die Richtlinie sagt weiter, dass «in Zementwerken grundsätzlich nur einheitlich zusammengesetzte, schadstoffarme Massenabfälle aus Industrie und Gewerbe entsorgt werden dürfen, die aufgrund ihrer stofflichen Zusammensetzung dazu geeignet sind. Sie sind insbesondere dann geeignet, wenn ihre Qualität mit den üblicherweise bei der Herstellung von Portlandzement eingesetzten Brenn- respektive Rohstoffen vergleichbar ist.»

Die Luftreinhalteverordnung LRV wiederum schreibt vor, dass «Abfälle in Zementöfen nur verwertet oder behandelt werden dürfen, wenn sie aufgrund ihrer Art, Menge und Zusammensetzung dazu geeignet sind. Das Bundesamt erlässt Richtlinien.» Diese Richtlinie²³ enthält eine «Positivliste» von Abfällen, die unter Auflagen in Zementwerken entsorgt werden können.²⁴ Abfälle, die nicht auf der Positivliste stehen, kommen dann in Frage, wenn sie gewisse Richtwerte nicht überschreiten.²⁵ – Der Begriff «*Richtwert*» impliziert allerdings nur einen *empfehlenden* Charakter und sollte besser als (verbindlicher) «*Grenzwert*» bezeichnet werden! – Ausserdem ergänzt die Richtlinie, dass die Klinkerproduktion nicht als *Senke für Schwermetalle* missbraucht werden darf. Um dies sicherstellen zu können, sind auch Richtwerte für Schadstoffe festgelegt worden, die im Klinker bzw. Portlandzement nicht überschritten sein dürfen.²⁶ So ist beispielsweise auch ein Zink-«*Richtwert*» fixiert, der die ver-

²² BUWAL (1998), Richtlinie: Entsorgung von Abfällen in Zementwerken. Vollzug Umwelt

²³ BUWAL (1998), Richtlinie: Entsorgung von Abfällen in Zementwerken. Vollzug Umwelt

²⁴ BUWAL-Richtlinie (1998), Anhang I

²⁵ BUWAL-Richtlinie (1998), Tabelle 1

²⁶ BUWAL-Richtlinie (1998), Tabelle 2

wendbare Menge Altreifen als Sekundärbrennstoff limitieren soll (Altreifen enthalten erhebliche Mengen Zinkoxid).

Eine ganz ähnliche Richtlinie gibt es in Deutschland, die ebenfalls mit «Richtwerten» operiert: Es sind dies die von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 1997 erarbeiteten Richtwertvorschläge für die Abfallverwertung in Zementwerken.²⁷

Wichtig ist auch der Hinweis, dass wegen des unterschiedlichen konstruktiven bzw. technischen Aufbaus der Zementanlagen nicht in jedem Zementwerk alle grundsätzlich in Frage kommenden Abfälle als Sekundärbrennstoffe verwertet werden können.

Tab.9: In den schweizerischen Zementwerken verbrannte Abfälle (in Tonnen)²⁸

Abfallbrennstoffe	1996	1997	1998	1999	2000	2001	Deutschland 2001 ^a
Altöl	46'600	38'701	46'474	43'199	46'775	41'299 20.0 %	129'000 10.1 %
Klärschlamm (ca. 95%TS)	18'600	25'538	23'046	29'707	35'374	37'076 18.0 %	– –
Altholz	24'300	19'610	–	–	–	–	72'000 5.7 %
Lösungsmittel Destillationsrückstände	11'600	17'353	15'874	11'493	18'063	21'863 10.6 %	41'000 3.2 %
Altreifen/Gummi	15'900	13'861	13'740	12'152	15'929	18'047 8.8 %	237'000 18.6 %
Kunststoff	7'000	10'855	20'130	21'894	22'680	23'776 11.5 %	21'000 5.3 %
Tierfett/Tiermehl	9'100	10'759	10'294	9'743	9'113	47'472 23.0 %	245'000 19.3 %
übrige	14'500	13'368	15'241	16'780	19'619	16'534 8.0 %	482'000 37.9 %
Summe [t]	147'600	150'045	144'799	144'968	167'553	206'067 100 %	1'272'000 100 %

^a zusammengestellt aus: Verein Deutscher Zementwerke (2002), Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2001.

Zum Vergleich: In allen schweizerischen KVAs wurden 2001 insgesamt 2'920'000 t Abfälle verbrannt.

Pyrolyse-Vorbehandlung von Altreifen bei Jura-Cement Wildeg

Das Zementwerk von Jura-Cement in Wildeg ist übrigens das einzige der Schweiz (weltweit?), das Altreifen nicht direkt in den Drehofen gibt, sondern vorgängig verschwelt und dadurch die Energienutzung optimiert.²⁹ Bei dieser Altreifen-Vorbehandlung handelt es sich um eine Pilotanlage, die mit der Abwärme der Klinkerkühlung beheizt wird. Die Verschwelung (Pyrolyse) erfolgt bei 900 – 1000°C. Die Altreifen werden in Asche (5%), Russ (30%), Stahl (15%) und Produktgas (50%) zerlegt. Die Feststoffe inkl. Stahl werden in den Drehofen gegeben und nachverbrannt bzw. in den Klinker eingebunden. Das Pyrolysegas wird als Brennstoff in der Rohmehl-Vorwärmung eingesetzt.

7.2 Emissionen von Zementwerken

Richt- und Grenzwerte

In der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts waren Zementwerke wahre Staubschleudern. Das Rohmehl wird staubförmig in den Zementherstellungsprozess gebracht. Das Aufheizen des Rohmeihls erfolgt im Gegenstrom zu den heissen Rauchgasen des Ofens. Die Rückhaltung des Reststaubes in der Abluft gelang erst mit der Einführung von Elektrofiltern. Mit dem Staub werden auch eine ganze Anzahl von Schadstoffen abgefiltert, weil diese an den Staub gebunden werden (Effizienz bis über 99%). Die abgeschiedenen Filterstäube werden wieder in den Zementherstellungsprozess rückgeführt und in den Klinker eingebacken.

²⁷ LAGA (1997), Massstäbe und Kriterien für die energetische Verwertung von Abfällen in Zementwerken.

²⁸ BUWAL-Homepage: Abfälle

²⁹ GSA Bern, Abfallsplitter 2/2000, S. 6 – 8

Die Luftreinhalteverordnung (LRV) enthält die Anforderungen an die Qualität der Emissionen der Zementindustrie. Die allgemeinen Bestimmungen sind im Anhang 1 der LRV und die ergänzenden bzw. abweichenden im Anhang 2 Ziffer 11 aufgelistet. Werden Abfälle in Zementwerken eingesetzt, gilt zusätzlich ein Emissionsgrenzwert für Quecksilber von 0.1 mg Hg/m³ Abluft.

Die gesetzlichen Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung (LRV) wirken bei Zementwerken teilweise milder als bei Kehricht- oder Sondermüllverbrennungsanlagen. Das hat prozess-technische Gründe. Die Raugasreinigungsstufen unterscheiden sich verfahrenstechnisch und sind in der Zementindustrie noch nicht so effizient wie bei KVAs. Die schweizerischen Zementwerke rüsten aber immer mehr auf und verringern den Abstand stetig.

In der LRV steht auch, dass «Abfälle in Zementöfen nur verwertet oder behandelt werden dürfen, wenn sie aufgrund ihrer Art, Menge und Zusammensetzung dazu geeignet sind. Das Bundesamt erlässt Richtlinien³⁰.» Siehe oben.

Tab.10: Grenzwerte für KVAs bzw. Zementwerke nach LRV

	Abfallverbrennungsanlage	Zementofen
Staub	10 mg/m ³	50 mg/m ³
Stickoxide	80 mg/m ³	≤ 800 mg/m ³
Schwefeloxide	50 mg/m ³	≤ 500 mg/m ³
Quecksilber	0.1 mg/m ³	0.1 mg/m ³

Tab.11: Einige Emissionen der fünf schweizerischen Holcim-Zementwerke (Mittelwerte 2001)³¹

	schweizerische Holcim-Werke pro Tonne Klinker ^a	schweizerische Holcim-Werke Fracht pro Jahr
Staub	34.1 g	76 t
Kohlendioxid^b (CO₂)	803'000 g	1'789'000 t
Schwefeldioxid (SO₂)	83.5 g	853 t
Stickoxide (NO_x)	1206.9 g	2'689 t

^a Umrechnung in «pro Tonne Zement» durch Multiplikation mit 1.13

^b thermisches + geogenes Kohlendioxid

Kohlendioxid CO₂

Rund 5% der weltweiten «anthropogenen» CO₂-Emissionen sollen durch die Zementindustrie verursacht sein³². Der globale CO₂-Ausstoss der Zementindustrie beträgt aktuell 1'230 Mio. t pro Jahr. Gemäss Prognosen soll dieser Jahresausstoss auf 2'900 Mio. t im Jahr 2020 ansteigen.³³

Von den CO₂-Emissionen der Zementindustrie stammen grob gesagt 50% aus den chemischen Vorgängen der Klinkerherstellung, 40% aus den Brennstoffen der Drehofenfeuerung, 5% aus der Stromerzeugung des im Zementwerk benötigten Stroms und 5% aus dem Transport des Zements zum Endverbraucher.

Pro Tonne produzierten Klinkers wurde 2001 bei den Holcim-Werken der Schweiz³⁴ etwa 531 kg CO₂ durch Entsäuerung bzw. Calcinierung freigesetzt («geogenes» CO₂). Hinzu kommt das «thermische» CO₂ der Drehofenfeuerung. Letzteres ist von Art und Menge des Brennstoffs der Primär- und Sekundärfeuerung abhängig und lag 2001 bei Holcim Schweiz

³⁰ BUWAL (1998), Richtlinie: Entsorgung von Abfällen in Zementwerken. Vollzug Umwelt

³¹ Holcim (2002a), Umweltdaten Holcim (Schweiz) AG 1999 – 2001.

³² Holcim (2002b), Corporate Sustainable Development Report 2002 Holcim Ltd.

³³ Kaufmann R. (2003), Zementherstellung – einfache Chemie mit riesigen Massen. NZZ (Forschung & Technik), Nr. 65, S. 71

³⁴ Holcim (2002a), Umweltdaten Holcim (Schweiz) AG 1999 – 2001.

im Bereich von 271 kg/t Klinker. D.h. insgesamt sind das 803 kg CO₂/t Klinker bzw. 1'789'000 t pro Jahr (Holcim-Werke). Je mehr fossile Brennstoffe wie Kohle, Öl, Benzin oder Gas eingesetzt werden, desto schlechter fällt die CO₂-Bilanz aus.

Weil die Zementindustrie wegen ihrer Emissionen und auch wegen der Steinbrüche (Natur- und Landschaftsschutz) immer wieder in der öffentlichen Kritik stand und steht, versucht sie seit langem ihre Umweltbilanz durch <Sonderleistungen> aufzubessern. Neuere Abkommen wie das Kyoto-Protokoll zwingt sie sogar dazu. CO₂-Zielvereinbarungen wie jene vom 10.2.2003³⁵ sind vielmehr eine <gesellschaftliche Pflicht> als ein <generöses Angebot>. Solche Zusagen zwingen die Zementindustrie aber auch dazu, stets nach günstigen Möglichkeiten zu suchen, Energie einzusparen und die Verbrennung fossiler Brennstoffe durch erneuerbare bzw. Verbrennung von Abfall zu substituieren. Als <sekundäre Brennstoffe> (Ersatzbrennstoffe) werden Klärschlamm, Tiermehl, Kunststoffe, Altöl, Altholz, Altpapier oder auch Altreifen eingesetzt (= teilweise nicht-fossile Brennstoffe). Dies führt zu Konflikten mit anderen Müllverbrennern und insbesondere auch mit Abfallrecyclingwerken, die höhere Auflagen bezüglich der Eingangskontrolle entgegengenommener Abfälle haben, höchsten Umweltauflagen genügen müssen und deshalb nicht mit den tiefen Preisen der Zementwerke konkurrieren können. Hinzu kommt, dass Zementwerke selbstverständlich ein Budget für den Einkauf von Brennstoffen haben und gerne für Sekundärbrennstoffe günstige Angebote machen. Solche CO₂-Vereinbarungen können daher <Seilschaften> etablieren, die die Konkurrenz benachteiligt.

Schwefeldioxid SO₂

Die Schwefeldioxid-Emissionen stammen zum grossen Teil aus dem mineralischen Rohmaterial. Der Schwefel kommt z.B. aus dem Pyrit im Rohmehl und wird in der Rohmehl-trocknung oder im Zyklonvorwärmer durch die heissen Ofenabgase oxidiert und ausgetrieben. Das aus dem Brennstoff freigesetzte SO₂ wird zum überwiegenden Teil im Zyklonvorwärmer am kalkhaltigen Rohmehl abgeschieden und dann in den Klinker eingebaut.

Die Schwefeldioxid-Emissionen können durch eine Rauchgasentschwefelungsanlage reduziert werden.

Die Jahresfracht der 5 schweizerischen Holcim-Werke an Schwefeldioxid lag 2001 bei 853 t, was 383 g/t Klinker (bzw. 337 g/t Zement) entspricht.

Stickoxide NO_x

Die Stickoxide werden zum grossen Teil beim Verbrennungsprozess freigesetzt. Der Brennstoff der Primärfeuerung wird mit Luft eingeblasen. Bei der hohen Verbrennungstemperatur finden dann Reaktionen zwischen dem Luftstickstoff und dem Luftsauerstoff statt, die zu den Stickoxiden führen (<thermische NO-Bildung>). Je höher die Temperatur desto besser die Qualität des Klinkers, aber auch desto mehr Stickoxide werden gebildet. Der NO_x-Gehalt in der Abluft kann durch Zugabe bestimmter Stoffe oder durch abgestufte Verbrennung gesenkt werden. Ausserdem reduziert eine weitergehende Rauchgasreinigung die Stickoxidemissionen weiter.

Die 8 Zementwerke der Schweiz haben einen Anteil von etwa 5% an den gesamten NO_x-Emissionen der Schweiz.³⁶ Die 5 Holcim-Werke emittierten im Jahre 2001 rund 2'700 t NO_x, das sind 1.2 kg NO_x pro Tonne Klinker (bzw. 1 kg pro Tonne Zement).

Schwermetalle

Das natürliche Rohmaterial der Zementherstellung enthält bereits Schwermetalle. Weitere werden über den Brennstoff ins System eingebracht. Die Schwermetalle werden in Abhän-

³⁵ siehe Homepage cemsuisse und Holcim

³⁶ Holcim (2002a), Umweltdaten Holcim (Schweiz) AG 1999 – 2001.

gigkeit ihrer Flüchtigkeit entweder partikelgebunden oder gasförmig transportiert. «Flüchtige» (bzw. halbflüchtige) Schwermetalle wie Quecksilber, Blei, Cadmium und Thallium können über die Abgase emittiert werden. Die schwerer flüchtigen Schwermetalle werden schliesslich in den Klinker eingebacken (eingesintert).³⁷ Aus diesem Grund hat das BUWAL in seiner Richtlinie eine «Positivliste»³⁸ jener Sonderabfälle erstellt, die unter gewissen Bedingungen in der Zementherstellung verwertet werden dürfen (teilw. enthält die Liste auch Grenzwerte für Schadstoffgehalte). Vorallem Teil B der Positivliste (Rohmehlersatzstoffe), die z.B. Giessereiabfälle, Abfälle aus der Strassenreinigung oder Rückstände aus Bodenwaschanlagen aufführt, lässt ungute Gefühle aufkommen, auch wenn jeweils spezifische (Grenz-)Richtwerte angegeben werden. Das vor allem auch deshalb, weil der Begriff «Richtwert» nur einen empfehlenden Charakter impliziert und besser klar als nicht zu überschreitenden «Grenzwert» bezeichnet werden sollte.

Das BUWAL hat auch (Grenz-)Richtwerte für Schadstoffe im Klinker³⁹ (teilw. auch für Zement) festgelegt, was der Entsorgung von Abfällen in Zementwerken Grenzen setzt (bis auf den Einwand, dass es auch hier nicht nur ein «Richtwert» sondern ein «Grenzwert» sein sollte). Das BUWAL möchte damit sicherstellen, dass der geogene Schadstoff-Hintergrund im Klinker durch Zuführen von Abfällen nur unwesentlich erhöht wird. Bei Altreifen ist daher der Zink-Gehalt ein limitierender Faktor. Cadmium kann in Kunststoffen enthalten sein und ist deshalb mit einem (Grenz)Richtwert belegt worden.

Abfälle, die nicht auf der Positivliste stehen, sind dennoch zugelassen, wenn der Gehalt an bestimmten Schadstoffen die in einer weiteren Tabelle der BUWAL-Richtlinie aufgeführten (Grenz-)Richtwerte nicht übersteigt.⁴⁰ Damit soll u.a. auch eine unkontrollierte und im Widerspruch zum Abfalleitbild stehende Verdünnung von Elementen im Zement verhindert werden. Da z.B. Quecksilber zum grossen Teil via Abluft emittiert würde, gehören quecksilberhaltige Abfälle nicht ins Zementwerk und dementsprechend tief ist der (Grenz-)Richtwert für Quecksilber angesetzt.

Uns liegen keine Angaben über die Schwermetall-Emissionen der schweizerischen Zementwerke vor, da diese nicht veröffentlicht werden und vertraulich seien. Es wäre wünschenswert, wenn auch diese Angaben in den regulären Umweltberichten der Zementindustrie offen deklariert würden. In Deutschland werden die Messwerte publiziert⁴¹, die Konzentrationen werden pro Normalkubikmeter Abluft angegeben; interessanter wären allerdings Angaben zu den Jahresfrachten. Zu Österreich haben wir Angaben für das Jahr 1992 im Internet gefunden.

Tab.12: Schwermetallemissionen in Österreich 1992⁴²

	Österreich Gesamt t	Industrie Gesamt t	Zementindustrie t	Zementindustrie mg/m ³
Blei (Pb)	216.9	20.48	0.147	
Zink (Zn)	99.4	18.46	0.545	
Nickel (Ni)	30.4	7.77	0.012	
Kupfer (Cu)	21.7	2.07	–	
Chrom (Cr)	5.6	2.76	0.024	
Selen (Se)	5.3	4.28	<0.001	
Cadmium (Cd)	5.1	0.48	0.027	~ 0.0046
Arsen (As)	4.6	0.65	0.011	
Quecksilber (Hg)	4.3	2.05	0.063	~ 0.0066

³⁷ BUWAL (1997), Abfallentsorgung in Zementwerken – Thesenpapier. Umwelt-Materialien Nr. 70

³⁸ BUWAL-Richtlinie (1998), Anhang I

³⁹ BUWAL-Richtlinie (1998), Tabelle 2

⁴⁰ BUWAL-Richtlinie (1998), Tabelle 1

⁴¹ Verein Deutscher Zementwerke (2002), Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2001.

⁴² Hackl, A. (1995), Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie. Wien

PCB, Dioxine, Furane

Die hohen Temperaturen im Drehofen zerstören die organischen Schadstoffverbindungen effizient. Im Vorwärmer wird allerdings ein Temperaturfenster durchlaufen, das die *de-novo*-Synthese im Gasstrom ermöglichen könnte. Nach Untersuchungen und Recherchen des BUWAL⁴³ findet die *de-novo*-Synthese aber nicht statt. Das wird auch aus Deutschland und Österreich^{44,45} bestätigt. Auch in den Elektrofilterstäuben finden sich keine persistenten organischen Verbindungen in kritisch erhöhter Konzentration.

⁴³ BUWAL (1997), Abfallentsorgung in Zementwerken – Thesenpapier. Umwelt-Materialien Nr. 70

⁴⁴ Verein Deutscher Zementwerke (2002), Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2001.

⁴⁵ Hackl, A. (1995), Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie. Wien

SZENARIO 2:

ALTREIFENVERWERTUNG DURCH «REVERSE POLYMERIZATION»

(patentiertes Verfahren von EWI, Kanada)

8 DAS VERFAHREN VON EWI: «REVERSE POLYMERIZATION»

Die kanadische Firma Environmental Waste International EWI hat ein Verfahren entwickelt, das den Reifengummi mit Mikrowellen-Energie zersetzt⁴⁶. EWI hat das Verfahren patentieren lassen und nennt es «Reverse Polymerization». Gemäss den Firmendokumenten handelt es sich um eine «umgekehrte Polymerisation», d.h. eine Zerstörung der Vernetzung der Kohlenwasserstoff-Kettenmoleküle sowie eine mehr oder weniger weitgehende Zerstückelung der Kettenmoleküle selbst; es handelt sich folglich um eine mikrowelleninduzierte Sublimation. Der Gummi wird nicht geschmolzen, sondern die Kohlenwasserstoffe werden direkt aus dem Gummi als Gas ausgetrieben. Abgesehen vom Stahl sind der Rest «ölgetränkte» Russgranulate (öhlaltiger Koks). Die Mikrowellen-Behandlung erfolgt bei 150 – 350°C (bei erheblich tieferen Temperaturen als bei einer Pyrolyse) im reduzierenden Milieu in einer Stickstoffatmosphäre, um keine unerwünschten Oxidationsprodukte zu bekommen und damit die Reifen nicht zu brennen beginnen. Im Mikrowellenreaktor bilden sich Kohlenwasserstoff-Dampf und H₂S; das «Prozessgas» enthält auch kurzkettige Kohlenwasserstoffmoleküle sowie Methan, Ethan, Propan, Butan etc. Stahl, Russ, Öle, Kohlenwasserstoffgas und der Schwefel (H₂S) werden in verschiedenen Reinigungsschritten voneinander getrennt und gereinigt. Der Schwefel landet schliesslich grösstenteils im Abwasser (ca. 7%ige Salzlösung aus Natriumsulfat und Natriumchlorid). Der Zink des Altreifens endet im Russ, der dann sinnvollerweise in der Reifenherstellung wiederverwendet werden sollte, da dort dieser Zinkanteil benötigt wird (soll möglich sein gemäss EWI).

Praktisch werden ganze Reifen in die Anlage geladen. Zunächst passieren sie mehrere Stickstoff-Schleusen bis sie auf das Gitter-Förderband in der Reaktionskammer gelangen. Auf dem Weg durch die Reaktionskammern passieren sie eine Folge von Magnetrons (bei einer TR-6000-Anlage 4x 150 = 600 Stück in Gruppen zu je 15 Stück), die sie mit Mikrowellen beschallen. Die Mikrowellen-Beschallung der Reifen kann variiert werden, jedes Magnetron kann von 200 W bis 1.45 kW abgeben. Der Reifen wird auf seinem Weg durch die 10 Mikrowellenkammern immer spröder und zerfällt schliesslich komplett. Stahlteile bleiben auf dem Gitter-Förderband liegen, öhlaltige koksartige Granulate fallen durch das Gitter, und das Gas kann abgezogen werden. Der für die Reaktionskammern benötigte Stickstoff wird mit einem Stickstoffgenerator vor Ort aus dem Luftstickstoff gewonnen.

Das Konzept von EWI besteht aus einer Grundeinheit, die etwa 1500 Reifen pro Tag verarbeiten kann und «TR-1500» genannt wird. Durch Zufügen weiterer «Grundeinheiten» werden TR-3000- und TR-6000-Anlagen aufgebaut.

Je grösser das Werk bzw. je höher der Altreifendurchsatz ist, desto besser kann prozesstechnisch optimiert werden und desto effizienter ist die Gesamtanlage. Der Betrieb einer kleinen Anlage ist – relativ gesehen – aufwendiger und vertilgt einen grösseren Anteil des «Gewinns», während ein grosses Werk effizienter arbeitet (siehe Flussdiagramm).

Szenarios

Je nachdem, wo eine solche Anlage zu stehen kommt und was sie optimalerweise an Produkten liefern soll, werden die Prozesse entsprechend optimiert. Eine Variante wäre ein selbständiges Verwertungswerk, das Altreifen einsammelt und die Produkte Russ, Stahlschrott und Strom verkauft. Es kann auch Sinn machen, eine EWI-Anlage als «Vorbehandlungseinheit» z.B. auf dem Gelände einer Zementfabrik zu betreiben, um die aus den Altreifen gewonnenen Kohlenwasserstoffe als hochwertigen Brennstoff zu nutzen. Es stellt sich auch die Frage, ob der nicht unerhebliche Strombedarf einer EWI-Anlage nicht günstiger aus dem Netz bezogen werden kann und die gewonnenen Kohlenwasserstoffe nicht verstromt sondern vollumfänglich direkt verbrannt oder zu verkaufsfähigen Produkten aufbereitet werden. Die ökologische Bilanz kann dann u.U. der finanziellen entgegenstehen.

⁴⁶ www.ewmc.com/Products/Tire/Products_Tire_1.html

Abb.3: Schema einer EWI-Anlage

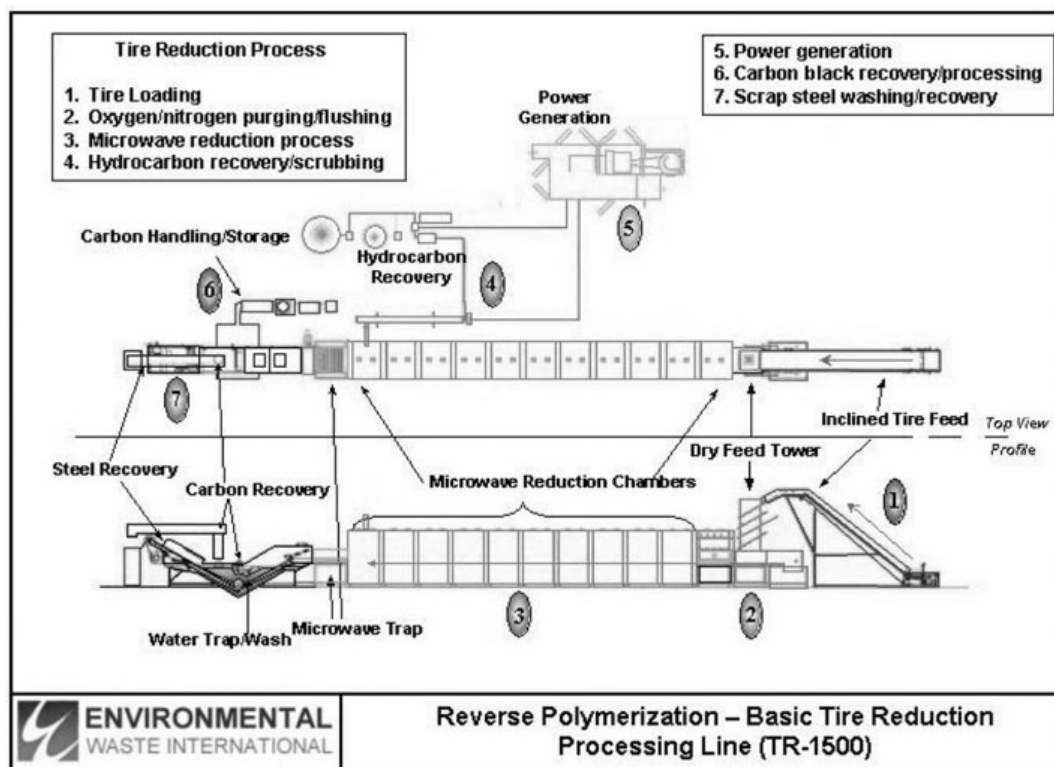
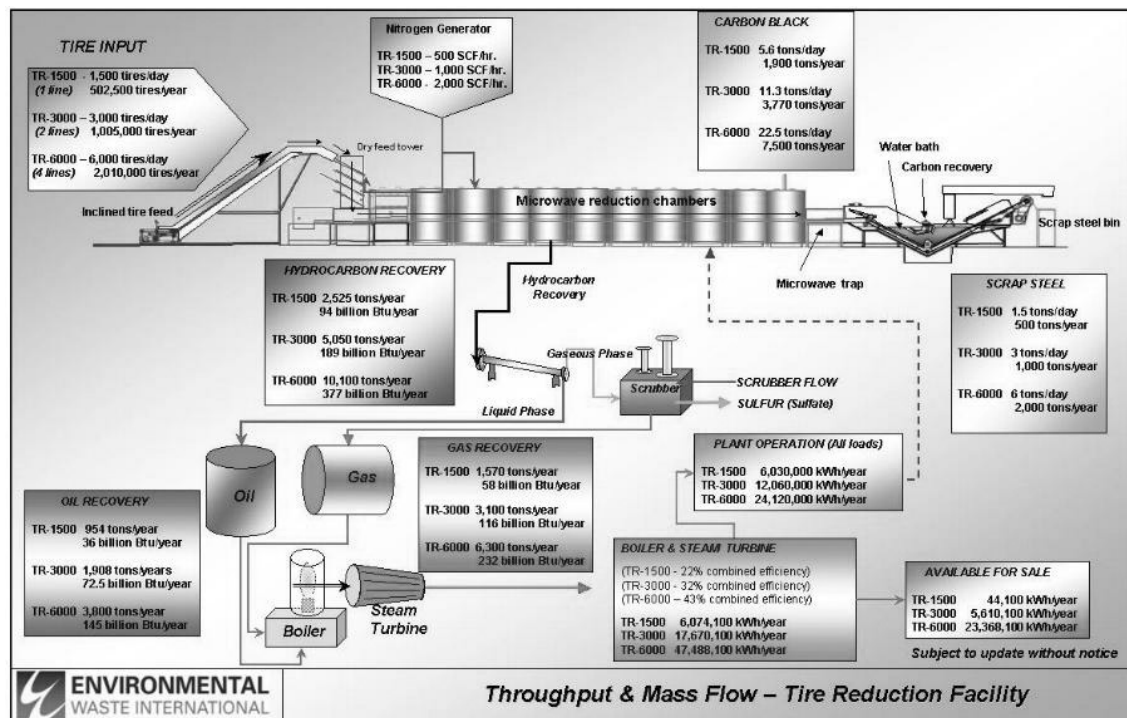


Abb.4: Flussdiagramm des «reverse polymerization»-Prozess

Erläuterungen: <TR-1500> bedeutet «tire reduction» pro Tag, also 1'500 Stück Reifen pro Tag
 EWI kalkuliert den Reifen zu ca. 10 kg
 BTU = British Thermal Unit, 1 BTU = 1'055.06 J
 SCF = standard cubic foot, 1 SCF = 28.3168 dm³



siehe auch: www.ewmc.com/Products/Tire/Products_Tire_1.html

Neben etwas Abgas und Abwasser (ca. 7%ige Natriumsulfat/-chlorid-Salzlösung), werden folgende marktfähigen Produkte gewonnen:

- Russ von hoher Qualität
- Stahlschrott
- Prozess-Öl und -Gas (Kohlenwasserstoffe)
- allenfalls Überschuss-Strom zur Einspeisung ins Netz, wenn Öl und Gas verstromt werden

Tab.13: Input/output-Daten gemäss Angaben EWI für eine TR-6000-Anlage

Input	pro Jahr	pro Tonne Reifen	Anmerkungen	
Altreifen/Jahr (335 Tg/a)	20'100 t		2'010'000 Stück	
Energieverbrauch	24'120 MWh	1.2 MWh		
Output-Produkte				
Russ (carbon black)	7'535 t	374 kg		
Stahl	2'000 t	99 kg		
sowie entweder:				
Produkt-Öl (ca. 40%)	3'800 t	189 kg	44'200 kJ/kg	19'000 BTU/lb
Produkt-Gas (ca. 60%)	6'300 t	313 kg	59'600 kJ/m³	1'600 BTU/SCF
oder:				
Überschussstrom Export	23'368 MWh	1.16 MWh		

Alle oben genannten Angaben stammen von EWI. Die Daten basieren auf konkreten Messwerten einer TR-330-Anlage und wurden hochgerechnet, da es noch keine grössere EWI-Anlage in Betrieb gibt. In Kanada und in England ist je eine TR-3000-Anlage konkret geplant. EWI hat die Recycling-Produkte der TR-330-Anlage untersuchen lassen und kann aufzeigen, dass sie marktfähige Qualität haben und sich werden verkaufen lassen. Der Russ kann auch noch aktiviert und zu Aktivkohle aufbereitet werden.

8.1 Vergleich mit einer Pyrolyse-Anlage (Werk Miltzow, Deutschland)

Die meisten der neu geplanten Altreifen-Verwertungsanlagen verwerten den Gummi in einem Pyrolyseprozess. Daher soll hier zum Vergleich mit dem EWI-Verfahren auch eine Pyrolyseanlage kurz vorgestellt werden. Weil die Konstrukteure und Betreiber der Anlage eher verschlossen waren, ist die nachfolgende Darstellung lückenhaft.

Als Pyrolyse bezeichnet man die vollständige thermische Zersetzung von organischer Substanz unter Luftabschluss ohne Einwirkung eines Vergasungsmittels. Der Prozess erfordert die Zufuhr von Wärmeenergie. Man unterscheidet zwischen:

- Schwelverfahren mit einer Prozesstemperatur unter 500°C,
- Mitteltemperaturpyrolyse im Temperaturbereich von 500 bis 800°C und
- Schmelzpyrolyse bei Temperaturen von 800 bis 1500°C.

Die Verbrennungszeit in Pyrolyseanlagen beträgt etwa 10 Stunden, also zehnmal so lange wie in einer Müllverbrennungsanlage. In Abhängigkeit von den gewählten Prozessbedingungen entstehen Pyrolysegas, -koks, -öl, bzw. -teer als Produkte. Das Pyrolysegas kann in nachgeschalteten Prozessstufen zur Erzeugung von Wärmeenergie genutzt werden.

Das europaweit erste grosstechnische Pyrolysewerk für Altreifenverwertung ist in Norddeutschland in Miltzow im Bau, es soll noch in diesem Jahr den Probetrieb aufnehmen⁴⁷.

⁴⁷ www.enviba.de/index.php

Gemäss Prospekt und Angaben im Internet soll das Werk dereinst 60'000 t Altreifen pro Jahr verwerten. Die Reifen werden zunächst vorsortiert, um noch einsatzfähig Reifen auszusondern. Die nicht mehr fahrbaren Reifen werden einer mechanischen Zerkleinerung unterworfen, weil nach der Pyrolyse Stahl- und Textilreste verloren wären. Abgesehen davon ist das Werk so auch in der Lage, Gummigranulate einer Körnung nach Kundenwunsch zu liefern. Die Pyrolyse des Gummigranulats findet in einem Drehofen unter Luftabschluss und bei 500 – 600°C unter Normaldruck statt. Das Pyrolysegas wird durch Abkühlung kondensiert und so in eine Öl- und eine Gasfraktion getrennt. Die Ölfraction kann nach Kundenwunsch aufbereitet werden, die Gasfraktion wird als Heizgas <intern> verwertet. Die Anlage produziert die benötigte Wärme- und elektrische Energie (das gesamte Werk braucht 1.2 – 1.5 MW, produziert werden max. 2.5 MW) selbst und kann Überschussstrom ans Netz abgeben (geschätzt 8 – 12 GWh/Jahr). Der Russ und weitere Zuschlagstoffe im Reifengummi werden in der Pyrolyse in Pyrolyse-Koks umgewandelt, der zu Russ gemahlen oder durch Aktivierung zu Aktivkohle aufbereitet werden kann.

Die Erbauer gehen davon aus, dass aus den Altreifen folgende marktfähige Produkte gewonnen werden können:

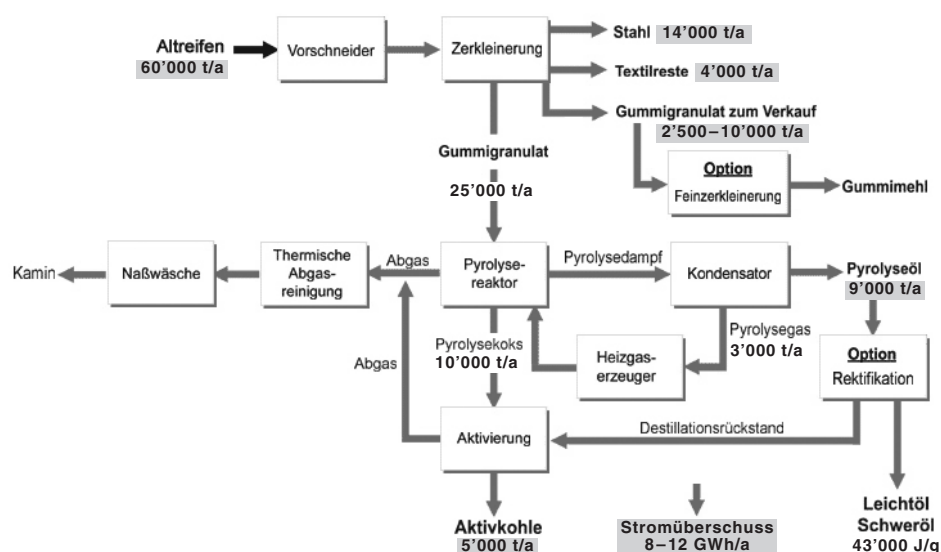
- Textilreste (watteartiges Material)
- Stahlschrott von hochwertigem Stahl
- Gummigranulat verschiedener Korngrößen
- Pyrolysekoks unterschiedlicher Korngrößen
- Aktivkohle
- leichtes Pyrolysegas mit einem oberen Heizwert von 43'000 J/g und geringem Schadstoffgehalt
- elektrischen Strom, ca. 8 – 12 GWh/Jahr

Zu den Emissionen wurden keine Angaben gemacht. Abluft und Abwasser werden nach dem Stand der Technik gereinigt, so dass die gesetzlichen Grenzwerte sicher eingehalten werden.

Der Konstrukteur und Erbauer des Miltzow-Werks hat umfassende Marktabklärungen durchgeführt und festgestellt, dass sich die Recyclingprodukte gut werden absetzen lassen.

Die Entsorgungsgebühr pro Tonne soll bei PW-Reifen 65 Euro und bei LW-Reifen 80 Euro betragen; unsortierte PW- und LW-Reifen kosten 90 Euro pro Tonne. Diese Preise sind günstig, wenn sie mittelfristig eingehalten werden können.

Abb.5: Stoffflussschema Altreifen-Pyrolysewerk Miltzow (Graphik von Homepage, ergänzt mit Angaben aus dem Prospekt)



8.2 Formex-Verfahren

Ein anderes Beispiel für ein Pyrolyse-Altreifenrecycling-Verfahren ist jenes der Firma BOS in Berlin, das sich «Formex» nennt⁴⁸. Auch hier wird betont, dass die Recyclingprodukte, insbesondere auch der Russ, gut marktfähig sind, und dass die Betriebskosten eines Formex-Werkes durch den Verkauf der Recyclingprodukte gedeckt sind.

9 ENTSORGUNGSGEBÜHREN

Abfallentsorger – wie z.B. Zementwerke – schliessen mit ihren Zulieferern Verträge ab, in denen Sonderkonditionen vereinbart sind. Aus diesem Grund sind die nachfolgend genannten Preise mit Vorsicht zu betrachten, auch weil sie – je nach Marktsituation – stark schwanken können.

EWI geht davon aus, dass eine Entsorgungsgebühr von Fr. 2.– pro Reifen bzw. in etwa Fr. 220.– pro Tonne den Betrieb einer Altreifenrecycling-Anlage vom Typ TR-6000 möglich macht, weil weitere Einnahmen durch den Verkauf der Recyclingprodukte sichergestellt seien.

Die Altreifenentsorgung in Zementwerken kostet *etwa* Fr. 160.–/Tonne und in Müllverbrennungsanlagen *etwa* Fr. 280.–/Tonne. Sonderabfall wie Auto-RESH kostet etwa Fr. 300.– bis 400.–/Tonne.

In Deutschland schwanken die Entsorgungspreise für Altreifen – gemäss Internet-Recherche – je nach Entsorger – im Bereich von Euro 100.– bis 180.– pro Tonne (1 Euro entspricht etwa Fr. 1.46).

Beim Pyrolyse-Werk Miltzow in Deutschland (siehe oben) soll die Entsorgung pro Tonne bei PW-Reifen 65 Euro und bei LW-Reifen 80 Euro betragen; unsortierte PW- und LW-Reifen kosten 90 Euro pro Tonne. Da das Werk noch nicht in Betrieb ist, könnten sich diese Preise noch ändern.

⁴⁸ www.bos-berlin.de/seiten/S-t-altreif.htm bzw. www.abf-engineering.de/

10 BEWERTUNG DER ENTSORGUNGSWEGE

Unsere Recherchen haben etwa folgendes Bild ergeben:

Weiterverwendung

Die umweltfreundlichste aller Varianten. Reifen sollten so lange wie möglich gefahren werden, so lange sie ein sicheres Fahrverhalten gewährleisten. Das Nachschneiden des Reifenprofils kann die Einsatzzeit eines Reifens verlängern, ist aber nur eingeschränkt und nicht bei allen Reifen möglich und daher sehr eingeschränkt empfehlenswert. Der Export von noch fahrbaren Occasionsreifen ist nur dann sinnvoll, wenn sichergestellt ist, dass die Reifen auch wirklich weiterverwendet und nicht wild deponiert oder verbrannt werden.

Eine spezielle Form der Weiterverwendung ist die Zweckentfremdung als Prallschutz (vorallem an Booten und in Häfen), zum Beschweren im Freien, «Umbau» in Schuhsohlen, etc. Vom Einsatz auf Kinderspielflächen wird aus Gründen der potentiellen Gesundheitsgefährdung abgeraten.

Runderneuerung

Die zweitbeste Lösung. Ein gewichtiger Teil des Reifens, die Karkasse, wird weiterverwendet und nur ein neuer Laufstreifen aufvulkanisiert. Der Energie- und Materialaufwand und die Umweltbelastungen der Runderneuerung sind im Vergleich zur Reifen-Neuherstellung gering. Die Qualität von runderneuten Reifen genügt hohen Ansprüchen. Dennoch kommen runderneute Reifen zu wenig zum Einsatz, sie sind die 2. Wahl und geniessen vorallem bei PW-Fahrern keinen guten Ruf. Hinzu kommt, dass der Preisvorteil gegenüber Billigreifen vernachlässigbar ist. Bei PWs liegt der Anteil runderneuerter Reifen bei wenigen Prozenten. Bei LWs ist der Anteil markant höher. LW-Reifen können bis zu 4x runderneuert werden. In Deutschland sind etwa 40% der Reifen an LWs runderneute Altreifen. Bei der Runderneuerung besteht Aufklärungs- und Nachholbedarf! Hier gilt auch das sichere Fahrverhalten (Nässe, Schnee, Bremsmanöver, Beständigkeit,...) der Reifen zu klären *und zu kommunizieren*: es sollte verstärkt für runderneute Reifen geworben werden.

Wertstoffliche Verwertung

Kann an dritter Stelle stehen, je nachdem, wie das Recyclat weiterverwendet wird.

Am Anfang sollte eine gute Triage der Altreifen erfolgen, die noch fahrbare Reifen aussortiert, damit diese als Gebrauchtreifen weiter gefahren werden. Der nicht mehr einsetzbare Altreifen wird dann mechanisch in eine Textil-, Metall- und Gummifraktion zerlegt. Der Energieaufwand ist desto grösser, je feiner der Gummi gemahlen wird. In der Gummitherstellung kann am besten Gummimehl wiederverwendet werden. Je gröber das Gummigranulat desto schwieriger die einwandfreie Vulkanisation (Quervernetzung) mit der neuen Gummimasse und desto grösser die Qualitätseinbussen. Reifenhersteller scheuen aus Qualitätsgründen (und allfälligen Regressforderungen bei Unfällen) die Verwendung von Recycling-Gummimehl. Die Zumischung von bis zu 2% Gummimehl soll in der Reifenherstellung unproblematisch sein; innovative Reifenhersteller sollen bis zu 20% «Altgummi» wiederverwenden. In Deutschland sollten einst besonders lauflärm- und laufwiderstandsarme Autoreifen mit weiteren «Ökoqualitäten» mit dem «Blauen Engel», einem Umweltzertifikat, ausgezeichnet werden. Das bewirkte aber einen derartigen Absatzeinbruch, dass die Reifenhersteller auf derartige «Umweltauszeichnungen» lieber verzichteten.

Altreifengummi muss nicht zwingend wieder in neue Reifen eingearbeitet werden, zumal die Reifenherstellung nur aufwendig feingemahlenes Gummimehl verwenden kann. Innovative Geister haben eine Vielzahl alternativer Einsatzmöglichkeiten entwickelt, die allerdings teilweise sehr zu hinterfragen sind. Besonders innovativ scheinen die USA zu sein. Dort wird

Gummigranulat in Asphaltbeläge, in Sportplatzunterböden, im Strassenunterbau, in Hinterfüllungen von Hausfundamenten etc. eingesetzt. Gummishredder wird sogar in Kleinkläranlagen (‹septic tanks›) als Ersatz für Geröll, d.h. als Aufwuchssubstrat (‹Festbett›) für den Biofilm verwertet.⁴⁹ Gemäss US-Studien sollen von Gummishredder und Gummigranulat so gut wie keine Umweltgefährdungen (Gewässer- und Grundwasserschutz) ausgehen. Andere, auch in Europa verbreitete Anwendungen sind die ‹Verschmelzung› von Gummigranulat zu gummihaltigen Kunststoffböden, Sportplatzbelägen, Gummischwellen oder Lärmdämmplatten.

Positive Aufmerksamkeit verdient unserer Meinung nach die Wiederverwendung von Reifengummi in Asphaltbelägen. In der Schweiz sind bis zu 2% Gummi-Zuschlag erlaubt. In USA und Schweden sind wesentlich höhere Anteile zugelassen. Studien haben belegt, dass Gummi-Asphalt die Lebensdauer des Strassenbelags um gut 75% verlängern kann, Frostrisse sind seltener und kleiner; hinzu kommt, dass Gummiasphalt auch weniger Fahrlärm macht (‹Flüsterasphalt›) und später überfriert (leicht reduzierte Glatteisgefahr). Bitumen und Gummi sind ‹chemisch verwandte› Stoffe, weshalb ein Vermischen keine ‹ökologische Straftat› ist.

Einen Grundsatz des BUWAL, den wir ausdrücklich stützen, ist der, dass Gummi nicht mit ‹artfremden› Materialien vermischt oder verschmolzen werden soll, weil dann das Recycling dieser Mischungen zunehmend schwierig wird. Deshalb stellen wir z.B. das Einmischen in Strassenunterbauten oder in Sportplatzunterböden in Frage; das sollte gut abgeklärt werden. Auch das Vermischen von PVC oder anderen Kunststoffen mit Gummigranulat für Sportplatzbeläge oder Kunststoffmatten ist bezüglich Recyclingmöglichkeiten abzuklären.

Wir fragen uns auch, als wie innert Gummi betrachtet werden darf und welche Umweltauswirkungen Gummishredder oder -Granulat im Boden haben können. Gummi zersetzt sich und setzt die teilweise toxischen Inhaltstoffe langfristig frei. Auch wenn sich dadurch keine unmittelbaren Grenzwertüberschreitungen im Boden, Gewässer oder Grundwasser ergeben, gibt Gummi toxische Substanzen in die Umwelt ab. Daher sollte Altreifengummi als umweltgefährdender Abfall gesehen werden und nicht in Böden eingemischt werden dürfen.

Rohstoffliche Verwertung (Recycling)

Welchen Rang die Recycling-Verfahren in dieser Auflistung haben, ist stark vom Verfahren abhängig. Diese Verfahren sind sicher besser als die Verbrennung von Altreifen in Heizkraftwerken oder gar das Deponieren.

Bei den ‹stofflichen› Recyclingmethoden steht im industriellen Massstab v.a. die Pyrolyse und neuerdings auch Verfahren wie die Mikrowellen-Sublimation (EWI) im Vordergrund. Aus dem Gummi werden v.a. Russ, Stahl und Kautschuk (in Form von Kohlenwasserstoffen: Prozess-Gas und -Öl) gewonnen. Der Kohlenwasserstoff-Anteil stellt einen hochwertigen, sauberen und zu etwa 25% ‹biogenen› Brennstoff mit hohem Brennwert dar. Diese Verwertung nutzt den im Altreifen vorhandenen Brennwert optimaler als die direkte Verbrennung ganzer Reifen, sagen EWI oder enviba. Der Russ wird aus dem Prozesskoks zurückgewonnen und soll von hoher Qualität und industriell marktfähig sein. Im Russ landet der ökotoxikologisch bedeutsame Zink; d.h. dieser Russ sollte sinnvollerweise am besten wieder Reifengummi zugesetzt werden, was gemäss EWI auch möglich ist.

Die fortschrittlichen dieser Verfahren haben das grosse Handycup, dass sie – im industriellen Massstab – noch neu und wenig erprobt sind. Jura-Cement hat eine weltweit einzigartige Pilotanlage zur Pyrolyse-Vorbehandlung von Altreifen seit knapp drei Jahren in Betrieb. Die weltweit erste, grosse Altreifen-Pyrolyse-Anlage geht im Sommer in Miltzow (Deutschland) in Betrieb. Grosse Anlagen nach dem Mikrowellen-Verfahren von EWI sind bestellt, aber noch nicht in Betrieb. Auch das Formex-Verfahren scheint noch nicht grossindustriell

⁴⁹ www.tnrc.state.tx.us/permitting/r_e/eval/we/tires/septic.pdf

umgesetzt zu sein (?). Erst die Erfahrungen mit diesen in Bau befindlichen Werken kann die technologische Entwicklung richtig in Gang bringen.

Die heutigen Industriegesellschaften setzen sehr auf Recycling (Ressourcenschonung), Prozess-Effizienz und dass möglichst keine problematischen Stoffe exportiert werden. Diese Ziele sind auch die Strategie der EU. Aus dieser Sicht machen die oben geschilderten Verfahren einer rohstoffliche Verwertung viel Sinn. Aber auch das nachfolgend beschriebene Verfahren der vorwiegend energetischen Verwertung in der Zementherstellung hat Prospekte, die nicht von der Hand zu weisen sind.

Thermische Verwertung

Zementindustrie

Die Verwertung von Altreifen in Zementwerken zählt zur thermischen (energetischen) Verwertung, obwohl auch eine stoffliche Verwertung erfolgt: Die Verbrennungsrückstände werden fast vollständig in den Zementklinker eingebacken. Aber der primäre Wert von Altreifen in der Zementherstellung ist der kalorische Brennwert und nicht der stoffliche. Altreifen sind auch deshalb für die Zementwerke wertvoll, weil Naturkautschuk ein pflanzliches Produkt ist und der Brennstoff Altreifen somit *zu etwa 25%* nicht-fossil (also «biogen») ist und eine entsprechende Menge fossiler Brennstoffe substituiert: Altreifen helfen der Zementindustrie, den treibhauseffektiven CO₂-Ausstoss zu reduzieren und den Forderungen des Kyoto-Protokolls besser nachzukommen.

Unsere Recherchen haben klar ergeben, dass – neben der Schweiz – auch in der EU und in USA der Verwertung von Altreifen in der Zementherstellung grosse Priorität zugestanden wird. In England kann man sich sogar vorstellen, dass alle Altreifen ab 2006 in Zementwerken entsorgt werden. Dennoch hat man auch in England nach anderen Varianten gesucht und zwei Verfahren der rohstofflichen Verwertung (Pyrolyse und Mikrowellen-Sublimation) gewählt, die nun gebaut werden sollen.

Heizkraftwerke

Die Verheizung von Altreifen in Heizkraftwerken ist weit abgeschlagen die ökologisch zweitschlechteste Methode der Altreifenentsorgung. Der Brennwert der Reifen wird genutzt, aber *nicht optimal*. Das Verfahren ist wenig umweltfreundlich und deshalb in Deutschland nicht mehr realisiert. Dieser Entsorgungsweg spielt in der Schweiz keine Rolle.

Deponien

Die schlechteste Art der Altreifenentsorgung. Offene Reifendeponien können in Brand geraten und stellen ein grosses Umweltrisiko dar. Aber auch das Ablagern in speziellen Sondermülldeponien ist eine sehr schlechte Lösung, weil der Altreifen wertstofflich komplett verloren geht. Die EU verbietet das Deponieren von Altreifen ab Juli 2006.

11 BESTEHENDE LCA-STUDIEN

Weil die Zeit zur Bearbeitung dieser Studie so kurz war, wurde nach bereits vorhandenen Studien gesucht. Zwei Arbeiten konnten gefunden werden:

- a) ifeu (1997), Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft – Fallbeispiel Verwertung von Altreifen. In: UBA-Text 10/99, Berlin
- b) Pré Consultants & BLIC (2001), Life cycle assessment of an average European car tyre. BLIC, Brussels

11.1 Studie des UBA Berlin

Die UBA-Studie untersucht folgende Entsorgungsvarianten:

1. Wiederverwendung im Ausland
2. Wiederverwendung durch Runderneuerung
3. Wiederverwendung von Gummigranulat in Neureifenherstellung
4. Verwertung von Gummigranulat in Bodenbelägen (als Ersatz von PVC)
5. Gummigranulat als Zuschlagstoff in Asphaltbelägen
6. Hydrierung und stoffliche Verwertung von Öl und Stahl
7. Vergasung und stoffliche Verwertung von Gas und Stahl
8. Verwertung von Altreifen in Zementwerken
9. Verwertung von Altreifen in thermischem Kraftwerk

Die verschiedenen Varianten wurden zunächst paarweise verglichen und dann in einen gesamten Vergleich gestellt. Der Gesamtvergleich erfolgte aufgrund von <Einwohnerdurchschnittswerten EDW> nach den folgenden Kriterien:

- fossile Ressourcen (KEA = kumulierter Energieaufwand)
- Treibhauseffekt
- Versauerungspotential
- Eutrophierungspotential
- Krebsrisikopotential

Zusammenfassend konnte folgende <Rangliste> erstellt werden:

- Die beste Gruppe umfasste die Varianten:
Runderneuerung (2), Gummi in Bodenbelägen als Ersatz für PVC (4) und Gummi als Asphaltzuschlagstoff (5)
- Die mittlere Gruppe umfasste die Varianten:
Wiederverwendung im Ausland (1), Gummigranulat in Neureifen (3) und Verwertung in Zementwerken (8)
- Die Schlussgruppe umfasst die Varianten:
Hydrierung (6), Vergasung (7) und Verwertung in thermischen Kraftwerken (9).

Verwertung in Zementwerken

Leider ist die UBA-Studie zu alt (bearbeitet ca. 1996) und hat noch keine <modernen> Verfahren des Altreifenrecyclings untersucht. Hydrierung und Vergasung sind eher <klassische> Verwertungsmethoden und schneiden nicht gut ab. Die Wiederverwendung von Gummigranulat ist meist klar (z.T. knapp) sinnvoller als die Verwertung der Altreifen in Zementwerken; schlecht schneiden die Zementwerke aber nicht ab.

11.2 BLIC-Studie: LCA eines durchschnittlichen europäischen PW-Reifens

Die aufwendige Studie wurde mit der Eco-Indicator- und EPS-Methode erstellt und ausgewertet. Der Bericht stellt eine Zusammenfassung der Arbeit dar und enthält deshalb kaum Auswertungen. Ausserdem beleuchtet die Studie den ganzen Lebenszyklus eines PW-Autoreifens, und dementsprechend ist nur ein Abschnitt der <end-of-pipe>-Phase gewidmet. Ein Ergebnis ist unter anderem, dass die Entsorgungswege von Altreifen die Ökobilanz eines Reifenlebens kaum belasten, auch wenn er deponiert wird. Ökologisch wesentlich relevanter ist die Ökobilanz der für die Herstellung eines Reifens benötigten Ausgangsmaterialien. Das zeigt aber auch, dass die Weiterverwendung bzw. einfache Recyclingverfahren sehr wichtig sind.

Bei der Altreifenentsorgung wurden u.a. folgende Varianten analysiert:

1. Export und Weiterverwendung
2. Runderneuerung
3. Verwendung von Gummigranulat (z.B. in Bodenbelägen, Asphalt,...)
4. Verwertung von Gummigranulat zur Herstellung von Synthesegas und -öl
5. Verwertung in Zementwerk
6. thermische Verwertung in Kraftwerk
7. Deponierung

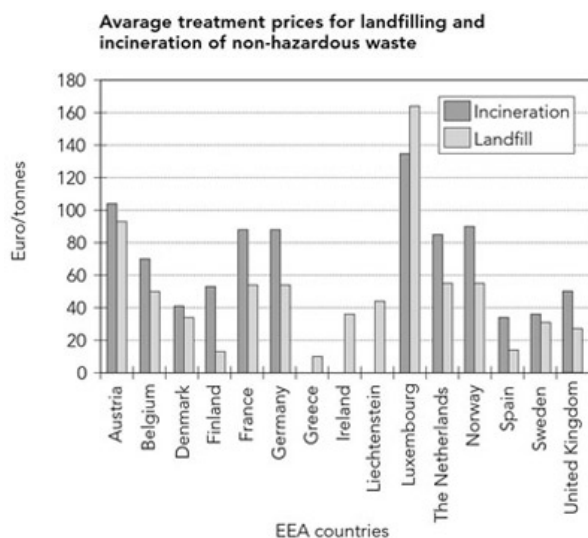
Je nach Auswertmethode kamen etwas unterschiedliche Gewichtungen heraus. Leider sind keine detaillierten Ergebnisse und gar keine für die Varianten 1 und 2 aufgeführt. Das generalisierte Ergebnis ergibt etwa folgende Rangliste:

An erster Stelle stehen die Recyclingvarianten der *Weiterverwendung* bzw. der *Verwertung von Gummigranulat*. In recht deutlichem Abstand kommt die Verwertung in Zementwerken, dann jene in thermischen Kraftwerken. Weit abgeschlagen ist die Deponierung. Auch in dieser Untersuchung schneidet die Verwertung in Zementwerken nicht schlecht ab.

12 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Entwicklung von effizienten Recyclingverfahren ist bei der Altreifenverwertung noch am Anfang. Die für die Reifenherstellung benötigten Rohstoffe sind relativ günstig. Auch scheint die Entsorgung von Altreifen – europaweit betrachtet – kein drückendes Problem zu sein. Deponieplatz ist immer noch und zu recht günstigen Preisen vorhanden, aber die EU-Politik hat sich diesbezüglich geändert: das Deponieren wird immer schwerer werden.

Abb.6



Wie bei anderen Abfallarten zeigt sich auch bei der Altreifenentsorgung, dass verschiedene erfolgsversprechende Verfahren entwickelt sind und erfolgreich betrieben werden könnten. Innovative, neue Verfahren, welche den «Recyclinggrad» (Menge und Qualität der zurückgewonnenen Wertstoffe) erhöhen wollen, stehen aber in einem harten Wettbewerb. Einerseits muss die ökonomische und ökologische Bilanz günstig(er) ausfallen als bei herkömmlichen Verfahren und andererseits müssen sie sich gegen die Konkurrenz der etablierten «Grossentsorger» durchsetzen.

Die Verwertung von Altreifen in der Zementherstellung ist in Europa gängige Praxis und – aus Umweltschutzsicht – nicht die schlechteste Lösung. Die Zementherstellung hat eine lange Tradition, die Prozessabläufe sind bis ins Detail bekannt. Altreifen sind beinahe ideale Sekundärbrennstoffe, alles wird verwertet, wäre da nicht der hohe Zinkgehalt, der in den Klinker eingebacken wird. In der Schweiz gibt es diesbezügliche «Richtwerte», die die verwertbare Menge Altreifen begrenzt. Besser wäre, die *Richtwerte* würden zu strikten *Grenzwerten*, da Richtwerte (zu) «flexibel» gehandhabt werden können. Weil der Brennstoff Altreifen willkommen ist, wird er zu günstigen Preisen von der Zementindustrie angenommen, die andere Entsorger nicht bieten können. Die Zementindustrie profitiert auch von teilweise milderen Emissionsgrenzwerten, weil sie – prozessbedingt – schwieriger als z.B. bei einer KVA zu erreichen sind. Die Zementindustrie – insbesondere in der Schweiz – verbessert die Rauchgasreinigung sukzessive, so dass demnächst für alle «Abfallverbrenner» gleiche Bedingungen festgelegt werden könnten. Skeptisch stimmt allerdings, dass die Schwermetallemissionen nicht veröffentlicht werden.

Innovative Recycling-Verfahren haben derzeit noch relativ schlechte Karten, weil sie im grossindustriellen Massstab kaum erprobt sind. Weil die EU aber immer mehr auf Kreislaufwirtschaft, d.h. Recycling setzt, steigt der Druck auf die Reifen- und Autobranche. Die EU-Altauto-Richtlinie verlangt, dass bis zum Jahr 2006 gewährleistet sein muss, dass 85 Gew.% eines Altautos wiederverwendet oder recycelt und *nicht* thermisch verwertet oder gar deponiert wird. Solche politischen Rahmenbedingungen führten dazu, dass nun erste Re-

cyclingwerke für Altreifen konkret in Bau sind, nicht in der Schweiz, aber z.B. in Deutschland oder in England. In einem Jahr schon dürfte der Erkenntnisgewinn daher erheblich sein und aufzeigen, welche Recyclingtechnologie erfolgversprechend ist.

In USA, Deutschland und England ist die mechanische Altreifen-Aufbereitung, die Herstellung von Gummishredder, Gummigranulat und Gummimehl, gut etabliert. Auch dieser Prozess ist erstaunlich energieaufwendig. Sehr sinnvoll wäre, diesen <Alt->Gummi wieder in die Reifenherstellung zurückzuführen. Doch da stellen sich noch verfahrenstechnische Probleme, die den Anteil von <Altgummi> in Neureifen limitieren. Andere Verwendungen von <Altgummi> reichen von guten Vorschlägen (z.B. Einmischung in Asphalt) bis zu sehr <kritischen> Ideen, die meist aus USA stammen. Reifengummi altert zwar langsam, setzt so aber seine teilweise toxischen Inhaltsstoffe frei. Gummi sollte nicht mit artfremden Materialien vermischt oder verschmolzen werden, weil dann das Recycling dieser <neuen> Produkte immer schwieriger wird.

Die **ökologisch weitaus beste Lösung** ist aber, den Reifen so lange wie möglich zu fahren. Eingesammelte Altreifen sollten daher einer guten Triage unterzogen werden, *bevor* sie wertstofflich verwertet werden, um möglichst viele noch fahrbare Reifen in den Occasionsreifenmarkt zurückzuführen (inkl. Runderneuerung!). Die weitere Verbesserung der Reifenqualität, um die Lebenserwartung zu erhöhen, wäre ebenfalls sinnvoll, wenn das nicht mit neuen Umweltbelastungen (insbes. bei den Gummi-Inhaltsstoffen) <erkauft> werden muss.

Von den nicht mehr fahrbaren Reifen sollten möglichst viele runderneuert werden, um wenigstens einen Teil des Altreifens zu <retten>, die Karkasse. Runderneuerte Reifen sind aber wenig geschätzt, obwohl sie qualitativ nicht minderwertig sind. Es braucht daher eine gute Imagekampagne zugunsten runderneuerter Reifen, um den Anteil von derzeit wenigen Prozent markant zu erhöhen.

Sollte eine vorgezogene Altreifen-Entsorgungsgebühr in der Schweiz eingeführt werden, was zu begrüßen wäre, sollte die Verwaltung der Gelder einer *unabhängigen* Instanz übertragen werden. Damit könnte erreicht werden, dass nicht weiterhin primär konventionelle Wege beschritten werden, sondern auch innovative Verfahren eine Chance bekommen, in dem sie speziell gefördert werden. In dieser unabhängigen Instanz sollten auch die Umweltverbände vertreten sein.

PUBLIKATIONEN (www-Hinweise Stand Februar 2003)

- Arbeitsgruppe neue Brennstoffe in der Zementindustrie (1995), Grundlagen zum Einsatz alternativer Brennstoffe in Zementwerken. Zu beziehen bei: Basler & Partner, Zollikon
- BUWAL (2001), Merkblatt Altreifen. Download => www.buwal.ch/abfall/docu/pdf/alt_pneu_d.pdf
- BUWAL (1998), Richtlinie: Entsorgung von Abfällen in Zementwerken. Vollzug Umwelt (Download => www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/abfall/zementwerkrichtlinie_d.pdf)
- BUWAL (1997), Abfallentsorgung in Zementwerken – Thesenpapier. Umwelt-Materialien Nr. 70
- cemsuisse (2002), Kennzahlen 2001. Bern. Download => www.cemsuisse.ch
- Department of Trade and Industry UK (2002), Discussion paper on a possible producer responsibility model for used tyres. Download => www.dti.gov.uk/environment/consultations/usedtyres.pdf
- Department of Trade and Industry UK (2000), Tyre Recycling – Factsheet. Download => www.dti.gov.uk/sustainability/downloads/tyre.pdf
- Hackl, A. (1995), Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie. Wien. Download => www.zement.at/downloads/hackl2.pdf
- Humphrey D.N. & L.E. Katz (2001a), Field study of water quality effects of tire shreds placed below the water table. In: Proceedings of the Conference on Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications, Air and Waste Management Association, Pittsburgh, PA, November, 2001. Download => www.rma.org/scraptires/pdf/field_study.pdf
- Humphrey D.N. & L.E. Katz (2001b), Five-year study of the water quality effects of tire shreds placed above the water table. Download => www.rma.org/scraptires/pdf/fiveyr_study.pdf
- ifeu (1997), Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft – Fallbeispiel Verwertung von Altreifen. In: UBA-Text 10/99, Berlin (www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/index.htm => thematische Suche => UBA-Forschungsberichtsnummer => 99-014)
- LfU Baden-Württemberg (2002), Entsorgung von Altreifen in Baden-Württemberg – Situationsbericht 03/2002. Sehr informativ: Download => www.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/altreifen/gesamtbroschuere.pdf
- NEWMOA, USA (2001), Beneficial use of tire shreds as lightweight fill for embankments and retaining walls – Factsheet. Download => www.newmoa.org/Newmoa/htdocs/solidwaste/BUDtirefactsheet.pdf
- Pré Consultants & BLIC (2001), Life cycle assessment of an average European car tyre. BLIC, Brussels
- Richers, U., Vehlow, J. & H. Seifert (1999), Programm zur Untersuchung thermischer Behandlungsanlagen für Siedlungsabfall. Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6298 (Mai 99). Forschungszentrum Karlsruhe. Download => www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psview?document=/fzk/6298
- Roy C., Chaala A. & H. Darmstadt (1999), The Vacuum Pyrolysis of Used Tires. End-Uses for the Oil and Carbon Black Products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 51 201-221. Download => www.gch.ulaval.ca/~darmstad/a_jap99.html
- U.S. EPA (1997), Air emissions from scrap tire combustion. EPA-600/R-97-115

Verein Deutscher Zementwerke (2002), Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2001.
Download => www.vdz-online.de/downloads/umwelt/umw01d.pdf

Watson Brown HSM Ltd (November 2001), Novel concepts in environmentally friendly
rubber recycling. Download => www.wb-hsm.com/Documents/IRSG.pdf

WEBSITES (Stand Februar 2003)

BLIC (European Association of the Rubber Industry): www.blic.be/frame.htm

BUWAL, Abfall: www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/fachgebiete/fg_abfall/index.html

Cemsuisse (Schweiz. Verband der Zementindustrie): www.cemsuisse.ch/index_g.html

Citron S.A., France (Auto-RESH-Entsorger): www.citron.ch/d/framee.htm

Enviba AG, Deutschland, baut die erste grosstechnische Altreifenrecyclinganlage Europas in
Miltzow: www.enviba.de/index.php

Weitere Informationen: www.ligmbh.de/de/idee.html

Europäische Altreifenbörse (European Scrap Tyre Exchange EUSTEX): www.eustex.com

European Tyre Recycling Association ETRA, Paris, France: www.etra-www.org (Website hat
momentan Probleme, ist umgezogen?)

EWI, Canada, Altreifenrecycling nach dem Mikrowellenverfahren:
www.ewmc.com/Products/Tire/Products_Tire_1.html

Gesetzgebung, eidgenössische: www.admin.ch/ch/d/sr/sr.html

Güteschutzgemeinschaft Reifenerneuerung: www.jgp.ch/gre/ (nur Adresse und keine weiter-
führenden Infos)

Heidelberg Cement (einer der weltweit grössten Zementkonzerne):
www.heidelbergcement.com/html/d/page.asp?pageID=1

Holcim Schweiz (produziert ca. 65% des schweizerischen Zements):
www.holcim.com/ch/de/jsp/templates/home.html

Holcim International (einer der weltweit grössten Zementkonzerne):
www.holcim.com/corp/en/jsp/templates/home.html

Jura Cement: www.juracement.ch/home_flash.htm

Reschner Kurt, Spezialist für Altreifenverwertung, sehr informative Homepage:
http://home.snafu.de/kurtr/str/de_prod.html oder
www.entire-engineering.de/str/de.html

Rubber Manufacturers Association, Scrap Tire Management Council, USA:
www.rma.org/scrapfctn.html

Rubber pavement, USA (<Flüsterasphalt>, Asphaltstrassenbelag mit Gummianteil):
www.rubberpavements.org/

Scrap tire news (USA): www.scraptirenews.com

Thermoselect (Müll-Pyrolyse): www.thermoselect.com/

Tyre Recycling (Texas Commission on Environmental Quality):
www.tnrcc.state.tx.us/permitting/r_e/eval/we/tires/recycling.html

Tyre Recycling: eine etwas spezielle Homepage => www.tyrerecyclingsuccess.com/

Stiftung Autorecycling Schweiz: www.stiftung-autorecycling.ch/

UBA Berlin: www.umweltbundesamt.de/

UBA Wien: www.ubavie.gv.at/ => Umwelt => Abfall

UTWG (Used Tyre Working Group, UK): www.tyredisposal.co.uk/

Verein Deutscher Zementwerke VDZ: www.vdz-online.de/



