



BAM

Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Reinhard Bach
Uwe Beck
Georg Reiners

Recycling von beschichteten Bauteilen

Branchen-, produkt- und verfahrensübergreifende Literaturstudie zum Stand und zu den Möglichkeiten des Recyclings von beschichteten Bauteilen

239

Forschungsbericht



Die Aufgaben
der Bundesanstalt
stehen unter der Leitlinie:

Sicherheit und Zuverlässigkeit in Chemie- und Materialtechnik

Die Aufgaben

Die BAM hat gemäß ihrem Gründungserlaß die Zweckbestimmung, die Entwicklung der deutschen Wirtschaft zu fördern. Sie ist im Aufgabenverbund „Material – Chemie – Umwelt – Sicherheit“ zuständig für:

- Hoheitliche Funktionen zur öffentlichen technischen Sicherheit, insbesondere im Gefahrstoff- und Gefahrgutrechtsbereich;
- Mitarbeit bei der Entwicklung entsprechender gesetzlicher Regelungen, z.B. bei der Festlegung von Sicherheitsstandards und Grenzwerten;
- Beratung der Bundesregierung, der Wirtschaft sowie der nationalen und internationalen Organisationen im Bereich der Materialtechnik und Chemie;
- Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmaterialien und -verfahren, insbesondere der analytischen Chemie und der Prüftechnik;
- Unterstützung der Normung und anderer technischer Regeln für die Beurteilung von Stoffen, Materialien, Konstruktionen und Verfahren im Hinblick auf die Schadensfrüherkennung bzw. -vermeidung, den Umweltschutz und den Erhalt volkswirtschaftlicher Werte.

Die Tätigkeitsbereiche

Das Tätigkeitsspektrum der BAM umfaßt die sich ergänzenden und aufeinander bezogenen Tätigkeiten:

- Forschung und Entwicklung
- Prüfung, Analyse und Zulassung
- Beratung und Information.

Die nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Aufgaben der BAM für Technik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Insofern arbeitet die Bundesanstalt mit Technologieinstitutionen des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstitutionen, eng zusammen. Sie berät Bundesministerien, Wirtschaftsverbände, Industrieunternehmen sowie Verbraucherorganisationen und unterstützt mit Fachgutachten Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Daneben ist sie in die internationale technische Zusammenarbeit eingebunden und im Bereich „Meßwesen – Normung – Prüftechnik – Qualitätssicherung“ (MNPQ) als nationale Institution für die Prüftechnik zuständig. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlreichen Fachgremien, gesetzlichen Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik in nationalen und supranationalen Einrichtungen.

Der Status

Die BAM ist als technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie Nachfolgeinstitution des 1871 gegründeten Staatlichen Materialprüfungsamtes sowie der 1920 gebildeten Chemisch-Technischen Reichsanstalt (CTR). Sie hat dementsprechend die Funktion einer materialtechnischen und chemisch-technischen Bundesanstalt. In ihr sind etwa 1700 Mitarbeiter, darunter mehr als 700 Wissenschaftler und Ingenieure, auf dem Stammgelände in Berlin-Lichterfelde sowie auf den Zweiggeländen in Berlin-Steglitz und Berlin-Adlershof tätig.

Dipl.-Chem. Reinhard Bach
Dr. rer. nat. Uwe Beck
Dr. rer. nat. Georg Reiners

Recycling von beschichteten Bauteilen

Branchen-, produkt- und verfahrensübergreifende
Literaturstudie zum Stand und zu den Möglichkeiten
des Recyclings von beschichteten Bauteilen

Impressum

Forschungsbericht 239

Redaktionsschluss 8/99

Herausgegeben von
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
D-12205 Berlin
Postanschrift: D-12200 Berlin
Telefon (0 30) 81 04-0
Telefax (0 30) 8 11 20 29
E-Mail: info@bam.de
Internet: <http://www.bam.de>

Copyright © 2000 by Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Herstellung und Verlag:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74-76
D-27568 Bremerhaven
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon (04 71) 9 45 44-0
Telefax (04 71) 9 45 44 77/88

Umschlag: Lutz Mittenzwei
Layout: BAM, Referat G.3 und Z.9

ISSN 0938-5533
ISBN 3-89701-522-6

Zusammenfassung

Auf Basis einer Literaturstudie werden der Stand und die Perspektiven des Recyclings beschichteter Bauteile vorgestellt. Die Studie ist verfahrens-, branchen- und produktübergreifend angelegt. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen werden erläutert, eine Auswahl beschichteter Bauteile und Materialkombinationen bezüglich ihrer Recyclingfähigkeit untersucht und unterschiedlichste Recyclingverfahren diskutiert. Auf die Bedeutung des Recyclings beschichteter Bauteile als spezieller Verbundwerkstoffe wird eingegangen.

Abstract

Based on an evaluation of relevant literature, the status quo and the prospects concerning the recycling of coated components are explained. The study covers several technologies, branches of industry and products. Moreover, the legal framework is presented. The discussion focuses on a number of coated components and combinations of certain materials with regard to their capability of recycling in terms of compound material.

Zusammenfassung, deutsch und englisch

1	Einleitung	7
1.1	Beschichtete Bauteile	7
1.1.1	Verfahren	7
1.1.2	Branchen	8
1.1.3	Produkte	8
1.2	Rahmenbedingungen	10
1.2.1	Aufgabenstellung	10
1.2.2	Gesetzgebung	10
1.2.3	Industrielle Umsetzung	11
2	Materialklassen	11
2.1	Substrate	11
2.2	Beschichtungen	11
2.3	Stoffmengen	12
3	Verwertungsverfahren	12
3.1	Großtechnische Verfahren	13
3.1.1	RESULT-Verfahren	13
3.1.2	Trentec-Verfahren	14
3.2	Materialspezifische Verfahren	14
3.2.1	Beschichtete Kunststoffe	14
3.2.1.1	Metallisierte Kunststoffe	14
3.2.1.2	Lackierte Kunststoffe	15
3.2.2	Beschichtete Metalle	16
3.2.2.1	Metallische Schichten	16
3.2.2.2	Lackschichten	17
3.2.2.3	Metallträgerkatalysatoren	18
3.2.3	Beschichtetes Glas	19
3.2.4	Beschichtete Keramik	20
3.2.5	Elektronikschrott	21
3.2.6	Verbundmaterialien	22
3.3	Produktspezifische Beispiele	23
3.3.1	CDs	23
3.3.2	Magnetbänder	24
3.3.3	Röntgenfilme	24

4	Diskussion	24
4.1	Zusammenfassung des status quo	24
4.2	Trends und Entwicklungen	26
4.3	Schlussbemerkung	27
5	Anhang	28
5.1	Gesetze, Verordnungen, Richtlinien	28
5.2	Adressenverzeichnis	29
5.3	Literatur-Recherche	31
5.4	Literatur-Zitate	31

1 Einleitung

1.1 Beschichtete Bauteile

Nahezu alle technischen Bauteile sind beschichtet. Diese Beschichtungen realisieren wesentliche funktionelle Eigenschaften. Durch das Beschichten gibt man der Oberfläche des Grundmaterials eine erwünschte, ihr selbst nicht innewohnende Eigenschaft. Man überzieht ein preiswerteres, leichter herzustellendes Substrat mit einem höherwertigen Material. Ziel einer Beschichtung ist die Funktionalisierung der Oberfläche oder die Kombination von Eigenschaften des Substrates und der Beschichtung. Beschichtungen realisieren z. B.

- den Korrosionsschutz des Bauteils (z. B. verzinkter Baustahl)
- Barriere- bzw. Schutzfunktionen (z. B. verchromte Armaturen)
- die Stabilisierung bzw. Hermetisierung der Oberfläche (z. B. modifizierte Kunststoffe)
- dekorative Funktionen (z. B. lackierte Karosserieteile)
- die Änderung von Oberflächeneigenschaften (z. B. die Kratzbeständigkeit von Verspiegelungen oder die Verschleißbeständigkeit von Lagern)
- spezielle optische (z. B. Filter), dielektrische (z. B. elektrische Isolation), elektrische (z. B. elektrostatische Abschirmung) oder magnetische (z. B. Datenspeicher) Eigenschaften
- spezielle chemische oder biologische Eigenschaften (z. B. katalytisch wirksame Oberflächen oder biokompatible Implantatbeschichtungen)
- eine Kombination der zuvor genannten Anwendungen.

1.1.1 Verfahren

Im DIN-Entwurf 8580-1985 „Fertigungsverfahren“ [1] werden sechs Hauptgruppen von Fertigungsverfahren definiert. „Beschichten“ bildet die Hauptgruppe 5; zusammen mit der Hauptgruppe 4 „Fügen“ bildet sie das Merkmal *Zusammenhalt vermehren*. Beschichten ist definiert als *Fertigen durch Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff auf ein Werkstück. Maßgebend ist der unmittelbar vor dem Beschichten herrschende Zustand des Beschichtungstoffes*.

Die DIN 8580 unterscheidet acht Gruppen von Beschichtungsverfahren, zu denen Untergruppen gehören, die teilweise in anderen Normen näher beschrieben werden:

- Beschichten aus dem flüssigen Zustand: Schmelztauchen, Anstreichen/Lackieren, Färben, Emaillieren/Glasieren, Beschichten durch Gießen, Drucken/Bedrucken, Beschichten
- Beschichten aus dem plastischen Zustand: Spachteln
- Beschichten aus dem breiigen Zustand: Putzen/Verputzen
- Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand: Wirbelsintern, elektrostatisches Beschichten, Beschichten durch thermisches Spritzen

- Beschichten durch Schweißen: Schmelzauftragschweißen
- Beschichten durch Löten: Auftrag-Weichlöten, Auftrag-Hartlöten, Auftrag-Hochtemperaturlöten
- Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand (Vakuumbeschichten): Vakuumbedampfen, Vakuumbestäuben
- Beschichten aus dem ionisierten Zustand: Galvanisches Beschichten, Chemisches Beschichten.

Verfahren wie Plattieren, Kaschieren (Aufkleben von Folien) oder Furnieren sind nach dem DIN-Entwurf Fügeverfahren, da diese „Schichten“ nicht aus formlosem Stoff erzeugt, sondern als geometrisch bestimmte Körper durch Kleben, Schweißen oder Löten mit dem Werkstück verbunden werden.

Eine Einteilung der Verfahren nach der Art des Schichtmaterials ist in der folgenden Übersicht zusammengestellt:

Metallische Schichten:

- **Thermisches Spritzen:** Flamspritzen, Lichtbogenspritzen, Detonations-spritzen, Plasmaspritzen
- **Schmelztauchen:** Feueraluminieren, Feuerverzinken, Feuerverzinnen, Feuerverbleien
- **Plattieren (nach DIN 8580 kein Beschichtungsverfahren):** Walzschweißplattieren, Schrumpfverfahren, Verbundgießen, Lötplattieren, Aufschweißplattieren, Sprengplattieren, mechanical plating
- **Galvanisieren:** Abscheiden von Aluminium, Blei-Zinn, Cadmium, Chrom (Hartverchromen), Gold/Gold-Legierungen, Kobalt, Kupfer, Kupfer-Zinn (Messing), Kupfer-Zinn (Zinnbronze), Nickel, Nickel-Cadmium, Silber/Silber-Legierungen, Zinn, Zinn sowie Spezialverfahren für andere Metalle
- **Stromlos Abscheiden:** Nickel, Nickel-Dispersionsschichten, Kupfer, Silber, Gold
- **CVD (Chemical Vapour Deposition; chemische Dampfphasenabscheidung):** Aufbringen von: Aluminium, Chrom, Molybdän, Nickel, Tantal, Titan, Wolfram u. a.
- **Diffusionsbeschichtung:** Alitieren (Aluminieren), Borieren, Chromieren, Nitrieren, Nitrocarburieren, Plasmanitrieren
- **PVD (Physical Vapour Deposition; physikalische Dampfphasenabscheidung):** Vakuumbedampfen, Sputtern (Aufstäuben), Ionenplattieren.

Anorganische nichtmetallische Schichten:

- **Chemisches Beschichten:** Chromatieren, Phosphatieren, Metallfärben
- **Anodisieren:** Anodisieren von Aluminium-Werkstoffen (Eloxieren), Magnesium-Werkstoffen, Titan-Werkstoffen, Zink-Werkstoffen

- CVD:
Aufbringen von Titancarbid, Titanitrid, Chromcarbid, Aluminiumoxid, Eisenborid
- PVD:
Vakuumbedampfen, Sputtern (Aufstäuben), Ionenplattieren
- Emaillieren:
Emaillieren von Stahl, Grauguss, Aluminium, Edelstahl sowie in der Schmuckemaillierung: Kupfer, Silber, Gold und Platin
- Thermisches Spritzen:
Aufbringen von Carbiden, Carbid-Metallen, Oxiden, Nitriden.

Organische Schichten:

- Anstreichen und Lackieren:
Streichen, Rollen
- Spritzen:
Niederdruckspritzen, Druckluftspritzen, Höchstdruckspritzen („airless“-Spritzen), Heißspritzen, elektrostatisches Spritzen
- Tauchen/Fluten:
Stromlos Tauchen, elektrophoretisches Tauchen, Fluten
- Beschichten mit Kunststoffen:
Streichen, Spachteln, Aufschumpfen, Tauchen, Flamm-spritzen, Wirbelsintern, Elektrostatisch Kunststoffpulverspritzen (EPS), Gummieren, PVD, Coil-Coating (Bandbeschichten), Thermopolymerisation und Plasmapolymerisation.

1.1.2 Branchen

Schicht/Substrat-Systeme werden heutzutage praktisch in allen Branchen eingesetzt. Historisch gesehen gibt es zwei Wurzeln:

1. Beschichtungen und Überzüge mit einer Schutz- bzw. dekorativen Funktion (Malerei, Emaille, Anstrichstoffe, ...) seit der Antike und noch früher

2. die modernen Schichttechniken (Elektronik, Halbleitertechnik, optische Schichten, ...), die großtechnisch seit den 60iger Jahren im Einsatz sind.

Heutige Anwendungsfelder sind die Fahrzeugindustrie (Lacke, Wärmeschutzverglasung, Reflektoren, Sensoren ...), das Bauwesen (verzinkter Baustahl, verzinkte Bleche für Heizungs- und Lüftungsanlagen, Wärmeschutzverglasung...), die Elektro- und Elektronikindustrie (Halbleiter, Leiterbahnen ...), die optische Industrie (Spiegel, Filter, Strahlteiler, Antireflexionsschichten ...), die Luft- und Raumfahrttechnik, die Solartechnik, der Maschinenbau (beschichtete Werkzeuge) und die Verpackungsindustrie (metallisierte Folien ...). Neben der Funktionalisierung von Oberflächen ist die Substitution herkömmlicher Werkstoffe durch neue mit anderen bzw. besseren Eigenschaften zu realisieren. Die Funktionalisierung von Oberflächen kann auch mit der Substitution der Substratwerkstoffe einhergehen. So wurden z. B. in der Automobilindustrie Kraftstofftanks aus Metall durch solche aus Kunststoff ersetzt. Der Kunststoff ist leichter und besser formbar. Um die Durchlässigkeit des Kunststoffs herabzusetzen, werden die Innenseiten der Tanks mit Hilfe von Plasmaverfahren mit Fluor modifiziert. In *Tabelle 1* sind einige weitere Beispiele von Branchen und Produkten aufgeführt.

1.1.3 Produkte

Nach Schätzungen sind ca. 90 Prozent aller Produkte beschichtet. In welcher Breite die Schichttechniken heute bei Massenprodukten Einzug gehalten haben, lässt sich am Fahrzeugbau darstellen: Galvanisierte Karosserieteile werden mehrfach lackiert, Fensterscheiben von Fahrzeugen erhalten Wärmeschutz- und Antireflexionsschichten. Reflektoren, Sensoren, Antennen, Displays sind weitere Beispiele. An einem serienmäßigen PKW werden allein ca. 3000 Teile galvanisch veredelt. *Tabelle 2* zeigt – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – eine Übersicht zu weiteren Anwendungen der Oberflächentechnik.

Tabelle 1
Ausgewählte Branchen der Oberflächentechnik

Branche	Produkt	Funktion
Automobilindustrie	Karosserie Reflektoren Fensterscheiben Sensoren	Korrosionsschutz Reflexionserhöhung Wärmeschutz Feuchte-, Temperatur-, Beschleunigungssensoren
Bauindustrie	Bauglas Lüftungskanäle Sanitärarmaturen	Energieeinsparung, Ästhetik Korrosionsschutz Ästhetik, Korrosionsschutz
Elektronik/ Elektrotechnik	Gehäuse Leiterplatten Solarzellen	elektromagnetische Abschirmung elektrische Leitfähigkeit Energiekonversion
Maschinenbau	Werkzeuge Lager	Standzeiterhöhung Verschleißschutz, Reibungsminderung
Optische Industrie	optische Filter Linsen Displays	Filterwirkung (Hoch-, Tief-, Bandpass) Entspiegelung Entspiegelung, aktive Schicht

Tabelle 2
Anwendungsbeispiele der Oberflächentechnik

Anwendung	Merkmale	Beispiele	Techniken
Dekoration	Farbe, Gestaltung, Glanz, optische Effekte, Strukturen, Energiebilanz	Uhren, Schmuck, Armaturen, Gebrauchsgegenstände, Bedienelemente, Freizeitartikel,	Galvanik, Lacke, Tauchen, Eloxieren, PVD- und CVD-Verfahren, Plattieren, mechanische Bearbeitung Bauelemente, Inneneinrichtungen
Oberflächenaktivierung	Oberflächenenergie, Benetzbarkeit	Vorbehandlung von Kunststoffen, Benetzungsverhalten gegenüber Feuchtigkeit	Plasmaaktivieren, thermisches Aktivieren, Plasmapolymerisation
Härtung	Härte, Standzeit	mechanische Bauelemente (Wellen, Getriebe, Kolben), Werkzeuge (Bohrer, Fräser, Schneiden)	thermische und thermochemische Oberflächenbehandlung, PVD- und CVD-Verfahren, thermisches Spritzen, Auftragschweißen
Verschleißschutz	Abrasives Verhalten, Härte, mechanische Widerstandsfähigkeit	mechanische Bauelemente und Werkzeuge (Bohrer, Fräser, Drehschneiden, Formwerkzeuge), Griffe, Windschutzscheiben, Brillen	thermische und thermochemische Oberflächenbehandlung, PVD- und CVD-Verfahren, thermisches Spritzen, Auftragschweißen
Korrosionsschutz, Passivierung	Beständigkeit gegenüber Chemikalien und Feuchtigkeit/Witterung, biologische Beständigkeit	mech. Bauelemente, Griffe, Armaturen, Uhren, Schmuck, verfahrenstechnische Anlagen, Baumaterialien, Fahrzeuge, Verpackungen, Kunststoffbehälter	thermo- und elektrochemische Oberflächenbehandlung, Speziallacke, Tauchen, thermisches Spritzen, Emaillieren, Galvanik, PVD- und CVD-Verfahren, Plasmapolymerisation
Diffusionsperren	Oberflächenenergie, Gaspermeabilität	Schutz gegenüber Feuchte oder „Gerüchen“ (Lebensmittel), Membranen, Tanks, Schläuche	Plasmapolymerisation, Lackieren, Aufschleudern, Tauchen
Reibungsverhalten (Tribologie)	Verminderung der Haft- und Gleitreibung, Rauheit	mech. Bauelemente (Wellen, Getriebe, Kolben, Ventile), Messer, Schneiden von Rasierapparaten, Ton- und Videobänder und -köpfe, Spritz- und Formwerkzeuge	Polieren, Galvanik, CVD-Schichten
Antihafverhalten	Oberflächenenergie, Benetzbarkeit, Haftungsverhalten	Gleitlager, Bratpfannen, Form- und Prägwerkzeuge, Wärmetauscher, Vermeidung von Griffspuren (Kameras, Armaturen)	CVD-Verfahren, Plasmapolymerisation, Spezialgalvanik
optische Funktionalität	Reflexions- und Transmissionsverhalten, Brechung, optische Aktivität, Wirkungsgrad	Spiegel, Vergütungen, Licht- oder Wärmeschutz, Anzeigen, Laseraktive Schichten, Solarzellen	PVD- und CVD-Verfahren, Galvanik, Polieren
sensorische Funktionalität	Empfindlichkeit bei Temperatur, Druck, Dehnung, Feuchte, Gasen, elektromagnetischer Strahlung	Sensoren und Detektoren (Temperaturwiderstände, Druckmeßzellen, Dehnungsmeßstreifen, Photozellen, Gassensoren, Feuchtesensoren, pH-Meßzellen, Branddetektoren)	PVD- und CVD-Verfahren, Dickschichtverfahren
mikro-technische Funktionalität	Strukturierbarkeit, Miniaturisierbarkeit, Systemintegration	Mikrodosiersysteme, Miniatur-Analysesysteme, integrierte Optiken	Dünnschichttechnik, Galvanik u. a. in Kombination mit Strukturierungstechnik (nasschemisch, Plasmaätzen)
elektrische Funktionalität	Leitfähigkeit, Strom-Spannungs-Kennlinien, Isolationsvermögen	elektronische Bauelemente, Sensoren, integrierte Schaltungen	Lacke, Galvanik, Dickschichten, PVD- und CVD-Verfahren, Oxidieren, Diffusion, Ionenimplantation
Aufbau- und Verbindungstechnik	Leitfähigkeit, Lötbarkeit, Langzeitstabilität, Beständigkeit, Isolationsvermögen	Leiterbahnen, Kontakte, Anschlüsse, EMV-Abschirmung	Galvanik, Schmelztauchen, Dickschichttechnik, PVD- und CVD-Verfahren
Biokompatibilität	Biologische Beständigkeit und Verträglichkeit	Implantate, Behandlungswerkzeuge, Verbandsmaterialien, Schmuck	Lacke, Tauchbäder, PVD- und CVD-Verfahren, Plasmaspritzen

1.2 Rahmenbedingungen

1.2.1 Aufgabenstellung

Unabhängig von allen Trends der öffentlichen Meinung und der aktuellen Gesetzgebung war es schon immer ein Gebot der Wirtschaftlichkeit, Produktionsabfälle und nicht mehr benutzte Produkte aller Art wiederzuverwenden, weiterzuverwenden oder zu verwerten. **Wiederverwendung** bedeutet, den Einsatz des gleichen Produkts für den gleichen Verwendungszweck (z. B. Pfandflaschen), **Weiterverwendung** einen Einsatz nach eventuellen geringfügigen Änderungen für einen anderen Einsatzzweck (z. B. Senfgläser als Trinkgläser). Bei einer **Wiederverwertung** wird das Produkt als solches zerstört, jedoch das Material bleibt erhalten (z. B. Einsatz von Altglas bei der Glasherstellung) und bei einer **Weiterverwertung** werden sowohl die Form als auch das Materialgefüge zerstört (z. B. die Umwandlung von Kunststoffen in Methanol). Wieder- und Weiterverwendung werden auch als **Produktrecycling**, Wieder- und Weiterverwertung als **Materialrecycling** bezeichnet. Sowohl die Kosten für nicht zur Herstellung eines Produkts genutzte Ausgangsstoffe als auch die Kosten für eine Entsorgung schlagen sich negativ in der Bilanz des herstellenden Unternehmens nieder. Handelt es sich bei den Abfällen um sortenreine Materialien, ist eine erneute Verwendung im ursprünglichen Produktionsprozess meist ohne weitere Anstrengungen möglich.

Verdeutlichen kann man die Problematik am Beispiel Weihnachtspätzchen: Der „Stanzabfall“, der beim Ausstechen der Weihnachtspätzchen übrigbleibt, kann erneut verknetet und ausgerollt werden. Eine Wiederverwendung ist unkritisch. Weiter behandelte, z. B. bereits gebackene oder gefüllte Teig, lässt sich nicht erneut in gleicher Weise wiederverwenden. Wenn die Behandlung im Aufbringen dünner Schichten besteht, ist eine Wiederverwendung von der Art der Beschichtung beeinflusst. Im Beispiel entspräche dies dem Bestreuen des Teiges mit Puderzucker. Ein erneutes Verkneten ergibt einen Teig, der etwas süßer ist, als der ursprüngliche Teig. Ob dies toleriert werden kann, hängt vom vorgegebenen Anforderungsprofil ab.

Handelt es sich um verschiedene, fest miteinander verbundene Materialien, ist eine erneute Verwendung schwierig, wenn nicht gar unmöglich. Dünne, fest haftende Schichten sind ohne eine ausgeklügelte Verfahrenstechnik noch weniger leicht abzutrennen. Nur bei einer hohen Wertschöpfung, z. B. bei Edelmetallen, sind Verfahren, die auf die Rückgewinnung des Schichtmaterials abzielen, wirtschaftlich. In der Mehrzahl der Fälle dient eine Schichtentfernung eher dazu, das Substratmaterial selbst in reiner Form wiederzugewinnen oder die Oberfläche des Bauteils für eine anschließende Wiederbeschichtung zu reinigen.

Ziel dieser Studie ist eine branchenübergreifende Analyse der Relevanz des Recyclings und der Entsorgung beschichteter Bauteile. Neben dem derzeitigen Stand der Technik und der Umsetzung in der Industrie sollen die Rahmenbedingungen und zukünftigen Möglichkeiten der Wiederverwendung und der Verwertung beschichteter Bauteile ermittelt werden.

1.2.2 Gesetzgebung

Nach Angaben des bayerischen Umweltministers vom September 1996 [2] wird das Umweltrecht in Deutschland durch ca. 800 Gesetze, 2 800 Verordnungen und 4 700 Verwaltungsvorschriften geregelt.

Grundlage aller Gesetze, Verordnungen und Richtlinien zum Umweltrecht ist in der Bundesrepublik Deutschland das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) vom 27. September 1994, das am 27. September 1996 in Kraft getreten ist [3]. Der Zweck des Gesetzes ist *die Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen und die Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen* (§ 1 KrW-/AbfG). Der § 4 Abs. 1 regelt die Grundsätze der Kreislaufwirtschaft:

Abfälle sind

1. *in erster Linie zu vermeiden, insbesondere durch die Verminderung ihrer Menge und Schädlichkeit,*
2. *in zweiter Linie*
 - a) *stofflich zu verwerten oder*
 - b) *zur Gewinnung von Energie zu nutzen (energetische Verwertung).*

Abfälle im Sinne dieses Gesetzes sind alle beweglichen Sachen, die unter die in Anhang I aufgeführten Gruppen fallen und deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung. (§ 3 Abs. 1 KrW-/AbfG)

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) löst das Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen vom 27. August 1986 [4] ab. Neu sind die Bestimmungen zur Kreislaufwirtschaft und die Einführung der Produktverantwortung (§§ 22-26). So heißt es einleitend im § 22:

(1) Wer Erzeugnisse entwickelt, herstellt, be- und verarbeitet oder vertreibt, trägt zur Erfüllung der Ziele der Kreislaufwirtschaft die Produktverantwortung. Zur Erfüllung der Produktverantwortung sind Erzeugnisse möglichst so zu gestalten, dass bei deren Herstellung und Gebrauch das Entstehen von Abfällen vermindert wird und die umweltverträgliche Verwertung und Beseitigung der nach deren Gebrauch entstandenen Abfälle sichergestellt ist.

(2) Die Produktverantwortung umfasst insbesondere

1. *die Entwicklung, Herstellung und das Inverkehrbringen von Erzeugnissen, die mehrfach verwendbar, technisch langlebig und nach Gebrauch zur ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung und umweltverträglichen Beseitigung geeignet sind,*
2. *den vorrangigen Einsatz von verwertbaren Abfällen oder sekundären Rohstoffen bei der Herstellung von Erzeugnissen,*
3. *die Kennzeichnung von schadstoffhaltigen Erzeugnissen, um die umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung der nach Gebrauch verbleibenden Abfälle sicherzustellen,*
4. *den Hinweis auf Rückgabe-, Wiederverwendungs- und Verwertungsmöglichkeiten oder -pflichten und Pfandregelungen durch Kennzeichnung der Erzeugnisse und*
5. *die Rücknahme der Erzeugnisse und der nach Gebrauch der Erzeugnisse verbleibenden Abfälle sowie deren nachfolgende Verwertung oder Beseitigung.*

Mit der Produktverantwortung ist durch das KrW-/AbfG das Verursacherprinzip in das Abfallrecht eingeführt worden. Wer die Produktverantwortung für welche Produkte und auf welche Art und Weise wahrzunehmen hat, wird durch Rechtsverordnungen der Bundesregierung bestimmt.

§ 5 regelt die sogenannten Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft. Dort heißt es in Abschnitt 2:

Soweit sich nach diesem Gesetz nichts anderes ergibt, hat die Verwertung von Abfällen Vorrang vor deren Beseitigung. Eine der Art und Beschaffenheit des Abfalls entsprechende hochwertige Verwertung ist anzustreben.

Und in Abschnitt 4 wird festgestellt:

Die Pflicht zur Verwertung von Abfällen ist einzuhalten, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist, insbesondere wenn für einen gewonnenen Stoff oder gewonnene Energie ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Die Verwertung von Abfällen ist auch dann technisch möglich, wenn hierzu eine Vorbehandlung erforderlich ist. Die wirtschaftliche Zumutbarkeit ist gegeben, wenn die mit der Verwertung verbundenen Kosten nicht außer Verhältnis zu den Kosten stehen, die für eine Abfallbeseitigung zu tragen wären.

1.2.3 Industrielle Umsetzung

Produktrecycling besteht aus den grundlegenden Arbeitsschritten Demontage, Reinigung, Aufarbeitung und Wiedermontage einschließlich Qualitätssicherung.

Materialrecycling, z. B. die Nutzung von Produktionsabfällen wird, wo möglich, schon immer in der Fertigung betrieben. Das ist solange kein Problem, wie es sich um sortenreine, noch nicht weiter behandelte Stoffe handelt. So können bei der Herstellung von Erzeugnissen aus thermoplastischen Kunststoffen Stanzabfälle, Ausschussware, etc. ohne weitere Behandlung erneut dem Fertigungsprozess zugeführt werden. Sobald jedoch das Produkt weiter behandelt worden ist, insbesondere durch Beschichtungen mit Lacken oder Metallen, handelt es sich um Verbundstoffe, die nicht ohne weiteres erneut in der Produktion wiederverwendet werden können.

Für wirtschaftlich arbeitende und ökologisch sinnvolle Verwertungsverfahren müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Konzentrationen der Stoffe, die zurückgewonnen werden sollen, müssen hoch genug sein
- störende Begleitstoffe müssen in möglichst geringen Konzentrationen vorhanden sein
- die verwendeten Technologien sollen möglichst einfach, robust und für die „Massenfertigung“ geeignet sein
- die Sekundärstoffe müssen gut wiederverwendbar sein.

Bereits die erste Bedingung zeigt, dass eine Wiederverwendung von Schichtmaterialien oft nicht wirtschaftlich ist, da sie in zu geringer Menge vorliegen. Eine gezielte Entschichtung findet folglich meist nur dann statt, wenn das Schichtmaterial bei einer Wiederverwendung des Substratmaterials stört, z. B. in Form einer Verschlechterung der Qualität des Rezyklats bzw. einer Anreicherung von Schadstoffen. Schichtmaterial wird dann wiederverwendet, wenn sein Wert die Kosten der Entschichtung übersteigt bzw. vom Preis her mit dem Primärrohstoff konkurrieren kann.

Für Werkzeuge und Hilfsgeräte von Beschichtungsverfahren, seien es Geräteträger oder Gitterroste aus Lackieranlagen oder Warengestelle, Körbe und Trommeln aus der Galvanik, werden erfolgreich Entschichtungsverfahren eingesetzt, um diese Teile häufiger und länger benutzen zu können [5]. Auch hier gilt die Prämisse, dass die Kosten der Entschichtung den Preis für eine Neubeschaffung nicht überschreiten dürfen.

Neben der Wirtschaftlichkeit der Wiederverwendung bzw. -verwertung spielt auch die Akzeptanz von Sekundärrohstoffen eine große Rolle. Nur eine ausreichende Qualitätssicherung überzeugt den Kunden von der Gleichwertigkeit des Sekundärprodukts mit dem Primärprodukt. Gegenwärtig schreiben Normen oft den Einsatz von Primärrohstoff zwingend vor, ohne die Eigenschaften des Materials als Kriterium heranzuziehen. Als Beispiele seien die DIN 19 537-2 [6], „Rohre und Formstücke aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) für Abwasserkanäle und -leitungen; Technische Lieferbedingungen“ und die DIN 19 534-2 [7], „Rohre und Formstücke aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U), mit Steckmuffe für Abwasserkanäle und -leitungen; Technische Lieferbedingungen“ genannt. In beiden heißt es im Abschnitt „Werkstoffe“ pauschal: „Regenerat darf nicht verarbeitet werden“.

2 Materialklassen

2.1 Substrate

Als Substrat für Beschichtungen kann jeder natürliche oder synthetische Werkstoff dienen. Welcher eingesetzt wird, hängt vom Preis, der Verfügbarkeit, dem Einsatzzweck, den Qualitätsanforderungen, den technischen Möglichkeiten des Herstellers und anderen Einflussfaktoren ab. Eingesetzt werden praktisch alle Stoffklassen wie Metalle, Kunststoffe, Gläser, Keramiken und Halbleiter.

Das Substrat dient als Träger für die Beschichtung. Es muss daher eine hinreichende Festigkeit und Tragfähigkeit aufweisen. Je nach Anwendung muss es weitere spezielle Eigenschaften aufweisen. Das sind zum Beispiel: Transparenz (Glas), elektrische Isolation (Keramik), geringe Masse (Kunststoff), hohe Festigkeit bei gleichzeitiger Dehnbarkeit (Metall).

Das Substratmaterial muss mit dem Beschichtungsmaterial bzw. dem Beschichtungsprozess kompatibel sein. Wenn die Haftung des Schichtmaterials auf dem Substrat ungenügend ist, wird oft eine Zwischenschicht eingefügt, die sowohl zum Substrat als auch mit dem eigentlichen Schichtmaterial eine ausreichende Haftung aufweist. Neben der „Klebstoff“-Funktion sind solche Zwischenschichten häufig auch in der Lage, mechanische Spannungen zwischen Schicht und Substrat zu minimieren.

2.2 Beschichtungen

Beschichten ist das Herstellen von funktionellen Oberflächen durch Auftragen metallischer bzw. nichtmetallischer anorganischer Überzüge oder organischer Beschichtungen. Zur Anwendung kommen metallische, anorganisch nichtmetallische oder organische Beschichtungsmaterialien. Die Auswahl richtet sich nach der Aufgabe, die die Schicht erfüllen

soll (z. B. Korrosionsschutz, Gleiteigenschaften, elektrische Leitfähigkeit, Dekorwirkung), nach den Einsatzbedingungen (z. B. der Temperaturbeanspruchung, der das beschichtete Bauteil im Dauer- oder Kurzzeitbetrieb ausgesetzt ist), der vorgesehenen Bauteil-Lebensdauer und nicht zuletzt den Kosten der Beschichtung.

Die verschiedenen Beschichtungsverfahren sind auf unterschiedliche Schicht/Substrat-Kombinationen zugeschnitten. Für Beschichtungen aus dem gasförmigen oder dampfförmigen Zustand, (z. B. Aufdampfen und Metallisieren) verwendet man Metalle oder Verbindungen, aus denen Metalle z. B. durch Pyrolyse freigesetzt werden.

Für Beschichtungen aus dem flüssigen, breiigen oder pastenförmigen Zustand (*Anstreichen, Streichen, Lackieren, Dispersions- oder Schmelzbeschichten, durch Extrudieren, Gießen, Tauchen*) werden u. a. natürliche (Kautschuk) und synthetische Polymere eingesetzt, die in Form von Schmelzen, organischen Lösungen, Organosolen, Plastisolen oder wässrigen Dispersionen aufgebracht werden.

Beschichtungen aus dem ionisierten Zustand (*Galvanotechnik, Eloxal-Verfahren, elektrophoretische Lackierung*) erfordern wässrige oder organische Lösungen von Salzen und anderen leitfähigen Stoffen.

Beschichtungen aus dem festen, d. h. körnigen oder pulverigen Zustand (*Pulverbeschichtung, Flamm-spritzverfahren, Sintern*) werden mit Pulvern von Polymeren, keramischen Massen, Metallen, Wachsen usw. durchgeführt. Häufig geschieht dies in der Wirbelschicht (Wirbelsintern). Metalle werden auch elektrostatisch mit Kunststoffpulvern beschichtet.

Auch für die Beschichtungen kommen praktisch alle Stoffklassen zum Einsatz: Metalle, Kunststoffe, Glas, Keramik und Halbleiter.

2.3 Stoffmengen

Die Gesamtmenge beschichteter Bauteile pro Jahr war wegen der unübersehbaren Vielfalt an Schicht- und Substratmaterialien nicht zu ermitteln und auch nicht Gegenstand dieser Studie. Einige Zahlen aus der Galvanotechnik sollen die Bedeutung der Beschichtungstechnologien in Deutschland exemplarisch vermitteln:

Der Umsatz der handwerklich organisierten Lohngalvaniken in Deutschland lag 1996 bei ungefähr 1,4 Milliarden DM, die Eloxal-Lohnveredler setzten etwa 800 Millionen DM um und die Leiterplattenhersteller und -zulieferer lagen bei 1,5 Milliarden DM Umsatz. In Betriebsgalvaniken einschließlich Leiterplattenfertigung betrug der Umsatz schätzungsweise 3,1 Milliarden DM [8].

Charakteristisch für beschichtete Bauteile ist der in der Regel recht geringe Mengenanteil des Schichtmaterials gegenüber dem Substratmaterial. Nur 0,02 Gramm Gold reichen aus, um 1000 elektronische Kontakte vor Korrosion zu schützen; 1 Kilogramm Zink kann 1 Tonne Schrauben vor Korrosion schützen. Das Verhältnis von Schichtdicke zu Substratdicke erstreckt sich über mehrere Größenordnungen von etwa 1:100 bei Lackierungen über 1:10 [4] bei PVD-Schichten (z. B. Al auf CDs) bis zu 1:10 [6] bei CVD-Schichten (z. B. in der Halbleitertechnik). Der Volumenanteil des Schichtmaterials am Gesamtverbund reicht also vom unteren Prozent- bis in den ppm-Bereich.

Eine CD ist zum Beispiel aus einem 1,2 mm starken Polycarbonatsubstrat, einer 100 nm starken Reflexionsschicht (Aluminium bei CDs, Gold bei wiederbeschreibbaren CDs) und 20-60 µm Schutzlack mit Farbdruck aufgebaut. Das Schichtdicken-Verhältnis von Reflexionsschicht zu Substrat beträgt 1:12 000 [9].

Gehäuse für elektronische Geräte, z. B. Computer, sind mit 2 µm dünnen Kupferschichten zur Abschirmung elektromagnetischer Strahlung ausgerüstet. Zum Schutz des Kupfers vor Korrosion ist meist noch eine 0,5 µm bis 1 µm dicke Nickelschicht aufgebracht. Einer Gehäusewandstärke von 1 mm entspricht also ein Dickenverhältnis von Schicht zu Substrat von 1:333 bis 1:400.

Metallic-lackierte Kunststoff-Formteile im Automobilbau (z. B. Stoßfänger) bestehen aus einem ca. 3 mm starken Substrat, 20-30 µm Primer zur Haftvermittlung bzw. zum Ausgleich kleiner Unregelmäßigkeiten, 10-15 µm Basislack und 30 µm Klarlack. Die resultierende Schichtdicke beträgt 60-75 µm. Das entspricht einem Schichtdicken-Verhältnis Beschichtung zu Substrat von 1:40 bis 1:50. Das sind 2-3 Vol.-% bzw. 3-4 Gew.-%, insbesondere wegen der hohen Füllstoffgehalte von Basislack und Primer.

Galvanische Schutzschichten, oft mit zusätzlichen dekorativen Funktionen, sind meist relativ dick. Die Schichtdicke galvanisierter Zierleisten liegt zum Beispiel bei rund 50 µm, was einem Metallanteil von ca. 15 Prozent entspricht. Das Firmen-Symbol eines deutschen Autoherstellers wiegt z. B. etwa 12 g, wovon auf die aufgebrauchte Metallmenge etwa 5,5 g entfallen.

3 Verwertungsverfahren

Verfahren zur Verwertung beschichteter Bauteile lassen sich grob in zwei Klassen einteilen:

1. Man wendet ein verwandtes Verfahren an wie bei der Beschichtung, z. B. können elektrochemisch aufgebraute Beschichtungen auch elektrochemisch abgetragen werden, thermisch hergestellte Schichten lassen sich thermisch entfernen, aus Lösungen erzeugte Schichten sind durch andere Lösemittel wieder ablösbar.
2. Man wendet je nach den Eigenschaften von Substrat- und Schichtmaterial unabhängig von der Vorgeschichte der Beschichtung materialspezifische Verfahren an. Die Auswahl eines Verfahrens wird von Materialparametern wie Härte, Zähigkeit, Längenausdehnung, Löslichkeit, thermische Beständigkeit u. a. bestimmt.

Ausschlaggebend für die Auswahl des Verwertungsverfahrens sind die Kosten sowie der Wert des Sekundärstoffes von Substrat und Schicht bzw. alternativ die Kosten einer Deponierung oder anderweitigen Verwertung.

Zur Wiederverwendung beschichteter Bauteile gehören nahezu immer zwei wesentliche Arbeitsschritte:

- Entschichtung (Delamination),
- Trennung der Materialien (Separation).

Vor-, zwischen- und/oder nachgeschaltet können Sortier-, Vor- und Nachbereitungs- und Aufarbeitungsprozesse sein.

Zur Entfernung von Schichten können im Prinzip alle Reinigungsverfahren für Oberflächen herangezogen werden. Nach

DIN 8592-1985 [10] kann man Reinigungsverfahren einteilen in:

- mechanisches Reinigen
- Reinigungsstrahlen
- strömungstechnisches Reinigen
- Lösemittelreinigen
- chemisches Reinigen und
- thermisches Reinigen.

Häufig findet man auch Kombinationen aus diesen Grundverfahren. Die einzelnen Grundverfahren bestehen aus verschiedenen Prozessvarianten:

Mechanisches Reinigen: Abwischen, Bürsten, Fegen, Abschleifen, Abschaben, Reinigungsschleifen, Ausklopfen

Reinigungsstrahlen: Druckluft-Reinigungsstrahlen, Nassdruckluft-Reinigungsstrahlen, Schlämm-Reinigungsstrahlen, Druckflüssigkeits-Reinigungsstrahlen, Dampfstrahlen, Schleuder-Reinigungsstrahlen, Trockeneis (CO₂)-Strahlen

Strömungstechnisches Reinigen: Waschen, Spülen, Abblasen, Absaugen, Ultraschallreinigen

Lösemittelreinigen: Ablösen, Abbeizen

Chemisches Reinigen: Beizen, Ablaugen, chemisch Umwandeln

Thermisches Reinigen: Abdampfen, Abflammen, thermisch Zersetzen, Reinigungsglühen.

Reinigungsverfahren werden meist zur Vorbehandlung von Bauteilen oder zur Säuberung von Werkzeugen eingesetzt, finden jedoch derzeit nur selten Anwendung bei der Wiederverwendung bzw. -verwertung von Schichtmaterialien.

Die Reinigungsverfahren sind auf den folgenden Beschichtungsprozess zugeschnitten. Einheitliche technologische Vorgehensweisen werden bevorzugt.

3.1 Großtechnische Verfahren

Als Universalverfahren bezeichnet man solche, die Werkstoffverbunde aller Art aufzutrennen in der Lage sind. Vorteile liegen vor allem im geringen Sortieraufwand vor der Aufbereitung und der Möglichkeit einer kontinuierlichen Betriebsweise, weil verschiedenste Materialien in einer Anlage behandelt werden können. Problematisch sind der große Fraktionieraufwand nach der Materialtrennung und die Vielzahl zu vermarktender Produkte, die zum Teil nur in geringen Mengen anfallen. Die weitere Aufarbeitung der Fraktionen erfolgt zum Teil in den Aufarbeitungsbetrieben selbst, wird jedoch auch an spezialisierte Betriebe weitergegeben. Die Aufarbeitung von beschichteten Bauteilen für eine Wiederverwendung oder -verwertung ist bei diesen Verfahren in der Regel nicht möglich. Bei Schichten, die sich in Härte oder Dichte nicht sehr vom Substrat unterscheiden, ist das Trennergebnis nicht immer befriedigend. Für beschichtete Bauteile, die nicht in großen Mengen und/oder an vielen verschiedenen Stellen anfallen, sind sie aber neben rohstofflichen bzw. thermischen Verfahren manchmal die einzige Alternative zur Deponierung.

3.1.1 RESULT-Verfahren [11]

Die schweizerische Result AG hat ein Verfahren entwickelt, das Werkstoffverbunde durch eine mechanische Entschich-

Tabelle 3
Produktbeispiele und Schichtdicken einzelner Materialien [11]

Produkt	Typ	Schichtdicken Metalle [mm]	Schichtdicken Kunststoffe [mm]	Schichtdicken sonstiges [mm]
Aluminium-Verbundfolien	Tubenlaminat	Al 0,02	PE 0,15	0,002
Litzen-Kabel	isolierte Kupferlitzen	Cu 0,1	PVC 0,2	—
elektronische Leiterplatten	FR4 Produktions-Abfälle	Cu 0,017 Pb/Sn 0,02	Epoxid-Harz 2,8	0,0015
PE-PS-Verbunde	Verpackungsverbund	—	PE 0,2 PS 0,35	—

Tabelle 4
Anteile und Ausbeuten einzelner Materialien [11]

Produkt	Anteile Metalle	Anteile Kunststoffe	Ausbeute Metalle	Ausbeute Kunststoffe
Aluminium-Verbundfolien	Al 25 %	PP 75 %	Al 97 %	PP 90 %
Litzen-Kabel	Cu 35 %	PVC 65 %	Cu 99,5 %	PVC 92 %
elektronische Leiterplatten	gesamt: 30 %	gesamt: 70 %	gesamt: 97 %	gesamt: 97 %
PE-PS-Verbunde	—	gesamt: 100 %	—	gesamt: 97 %

tung und Separation in Metall- und Kunststoff-Fractionen aufspaltet. Das Kernstück des Verfahrens ist ein sogenannter „Beschleuniger“. In diesem werden die zerkleinerten Verbundstoffe auf eine hohe Geschwindigkeit gebracht und unter Ausnutzung von Ultraschall-Effekten aufgeschossen. Durch die unterschiedlichen Reaktionen auf die Beschleunigungen und Verwirbelungen erhalten die Verbundelemente eine unterschiedliche Struktur, Geometrie und Dimension. Das Verfahren ist auch für Leiterbahnen und dünnste Schichten geeignet. Die Metalle z. B. werden umgeformt und bauen sich kugelig auf. Konventionelle Trennverfahren sorgen anschließend für eine Sortierung der Stoffe. Die *Tabellen 3 und 4* zeigen einige Anwendungsbeispiele bzw. die resultierenden Materialausbeuten beim Result-Verfahren:

3.1.2 Trentec-Verfahren [12]

Ende 1998 hat das erste Werk der Trentec Wertstoffrückgewinnungsanlage AG in Rockensußra in Thüringen seinen Betrieb aufgenommen. Eine zweite Anlage wird 1999 im Warenwirtschaftszentrum Havelland bei Berlin errichtet und soll bis zum Ende des Jahres seinen Betrieb aufnehmen. Für die Trennung der Verbundstoff-Komponenten wird die hohe mechanische Kraftwirkung des Ultraschalls ausgenutzt.

Die Verbundstoffe werden vorsortiert in „Vormaterial grob“ und „Vormaterial fein“. „Vormaterial grob“ enthält Materialien, die gesteckt, geschraubt, gepresst oder ähnlich miteinander verbunden sind. In der Regel reicht bei diesen Materialien ein Aufschluss durch einfaches Shreddern. Die Fraktion „Vormaterial fein“ besteht in der Hauptsache aus Materialien, die eloxiert, lackiert, coextrudiert, bedampft oder auf ähnliche Weise miteinander verbunden sind. Ein Aufschluss dieser Materialien ist grundsätzlich nur über eine Rotorschere möglich. Eine Vorzerkleinerung erzeugt die für den Aufschluss im Rotor notwendige Größe. Anschließend wird beim Ultraschall-Trennverfahren durch die hohe Leistungsdichte des Ultraschalls die Adhäsion zwischen den unterschiedlichen Stoffen aufgehoben. Die Verbundstoffkomponenten lösen sich dabei schichtweise ab und lassen sich anschließend voneinander trennen.

Die entstehenden Wertstoffe, z. B. Kupfer, Aluminium und wiederverwertbares Kunststoffgranulat – können zu Marktpreisen verkauft werden.

3.2 Materialspezifische Verfahren

Bezogen auf die Probleme bei der Trennung von Schicht und Substrat kann man grob klassifizieren nach der Ähnlichkeit von Schicht und Substrat: harte Schicht auf hartem Substrat, weiche Schicht auf weichem Substrat, weiche Schicht auf hartem Substrat und harte Schicht auf weichem Substrat. „Hart“ und „weich“ sind dabei nicht alleine auf die Materialeigenschaft Härte bezogen, sondern auch auf Kriterien wie Schlagzähigkeiten, Längenausdehnungskoeffizienten und ähnliches.

Unterschieden werden muss auch zwischen **verträglichen** und **unverträglichen Werkstoffkombinationen**. Bei verträglichen Werkstoffen ist eine vollständige Trennung nicht unbedingt erforderlich, wenn das Vorhandensein von Resten der Beschichtung die Wiederverwendung beziehungsweise Wiederaufarbeitung des Substrats nicht beeinträchtigt.

Unverträgliche Werkstoffkombinationen müssen jedoch vor einer weiteren Aufarbeitung vollständig voneinander getrennt werden. Kupfer ist ein sogenanntes „Stahlgift“ und muss vor einer Verarbeitung von Metallschrott in der Stahlhütte abgetrennt werden, Lack- oder Metallreste beeinträchtigen die Eigenschaften von werkstofflich recycelten Thermoplasten. Dabei verschlechtern zurückgebliebene Metallpartikel nicht allein die Optik und Haptik des Rezyklats, sondern beeinflussen auch dessen Eigenschaften negativ bzw. schädigen die Verarbeitungsmaschinen. Zusätzliche Reinigungsschritte zum Beispiel durch Schmelzefiltration sind aber aufwendig und teuer.

Ist eine vollständige Trennung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich unattraktiv, kann man eventuell Verträglichkeitsvermittler einsetzen [13]. Besser ist es, bei der Produktentwicklung bereits verträgliche Materialien zu berücksichtigen und/oder weniger verschiedenartige Materialien zu benutzen.

3.2.1 Beschichtete Kunststoffe

Kunststoffe bieten sich wegen kostengünstiger Fertigung, nahezu freier Form- und Farbgebung, geringem Gewicht und einem hohen Integrationsgrad für Anwendungen aller Art an. Bauteile aus Kunststoff werden aus funktionellen und/oder dekorativen Gründen beschichtet. Als Beschichtungsmaterialien kommen vorwiegend Metalle oder Lacke zum Einsatz. Metallisierte Kunststoffteile werden allein in Deutschland zur Zeit in einer Größenordnung von mehreren hunderttausend Tonnen mit einem Marktwert in Milliardenhöhe hergestellt. Auch die Trennung von Kunststoff-Verbunden geschieht meist in zwei Schritten:

- Entschichtung (Delamination)
- Trennung der Materialien (Separation).

Die Entschichtung wird überwiegend durch eine trockenmechanische Belastung des Verbundes durch Prall- oder Reibevorgänge herbeigeführt. Der Verbund gibt dann an seiner schwächsten Stelle nach. Es werden also eine oder beide der Verbundkomponenten zerkleinert oder der Verbund reißt an der Grenzfläche auf. Das Ergebnis ist eine lose Schüttung der vorher fest aneinander haftenden Verbundbestandteile. Diese Schüttung wird mit bekannten physikalischen Trennverfahren in ihre Bestandteile getrennt. Welches Verfahren zum Einsatz kommt, hängt von den Eigenschaftsunterschieden der Materialien ab. Existieren Unterschiede in Härte und Korngröße, kommen Siebverfahren und härteselektive Trennverfahren zum Einsatz, zusätzlich werden Metallabscheider und Dichtesortierungen verwendet.

3.2.1.1 Metallisierte Kunststoffe

Metallische Schichten auf Kunststoffteilen werden durch Galvanisieren, Bedampfen oder Bekleben mit zuvor bedampften Folien erzeugt. Zu den typischen Einsatzgebieten gehören die Elektronikbranche (Leiterplatten, Gehäuse, Abschirmungen, Kontakte), die Automobilbranche (Zierleisten, Kühlergrills, Fahrzeugembleme, Lufteinlassgitter, Türgriffe, Armaturentafeln), der Haushalts- und Sanitärbereich (Armaturen, Sichtabdeckungen, Gehäuse), Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt (EMV, Antistatik), die Medizin (Spiegel), die Telekommunikation (Spiegel), die Optik (Strahlteiler) und

die Verpackungsindustrie (metallkaschierte Kunststoffe als Verpackungen für Arzneimittel, bedampfte Folien für Lebensmittel). Als Beschichtungsmaterialien kommen hauptsächlich Kupfer, Nickel, Aluminium und Chrom zum Einsatz.

Zur Sicherung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) sind Kunststoffgehäuse elektrisch leitfähig ausgerüstet. In den meisten Fällen geschieht das durch Metallisieren der Oberfläche. Industriell eingesetzt werden Galvanisieren, Bedampfen mit Aluminium und Lackieren mit Leitlacken. Die Schichtdicken liegen zwischen 2,5 µm und 10 µm bei der Bedampfung und zwischen 15 µm und 50 µm bei der Lackierung [14]. Die Firma *Atotech* erreicht mit ihrem „Covertron“-Verfahren die notwendige Abschirmung auf elektrochemischem/galvanotechnischem Weg mit nur 2 µm Kupfer und 12 µm Nickel [15].

An metallisierten Kunststoffen können exemplarisch die Verwertungswege von Kunststoffen im allgemeinen aufgezeigt werden [16]. Eine Deponierung ist weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll. Allein die großen Mengen an Metall und Metalloxiden, die dadurch in die Umwelt gelangen, verwehren diesen Weg, besonders weil es sich zu einem großen Teil um Nickel und Chrom handelt. Die thermische Nutzung oder Verwertung ist eine zwar schnelle, aber keine sinnvolle Lösung. Sie führt zu Luftbelastungen und zu Restmengen, die als Sondermüll deponiert werden müssen. Auch fällt eine Energiebilanz im Vergleich zu Verfahren, bei denen der Werkstoff erhalten bleibt, deutlich schlechter aus. Wenn andere Verfahren noch nicht zur Verfügung stehen, kann die thermische Nutzung zur Zeit als einzige Alternative wirtschaftlich sein.

Eine rohstoffliche Verwertung erfordert sehr große Mengenströme; auch darf der Restmetall- und der Halogengehalt eine bestimmte Größe nicht überschreiten.

Bei der werkstofflichen Verwertung stören metallische Schichten auf Kunststoffen. Die mechanischen Eigenschaften verschlechtern sich, wenn das Metall nicht vor der Aufarbeitung des Kunststoffes abgetrennt wird. Zerkleinerte und in den Kunststoff eingemischte Metallpartikel wirken wie Kerbstellen. Auch werden die Optik und Haptik negativ beeinflusst, wenn Metallpartikel an der Oberfläche sichtbar und fühlbar werden. Nicht zuletzt besteht die Gefahr von Schäden an den Kunststoffverarbeitungsmaschinen. Der entscheidende Punkt für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung von metallbeschichteten Kunststoffen ist also der Aufschluss des Metall-/Kunststoff-Verbundes. Dazu dienen physikalisch-mechanische Prozesse. Im großtechnischen Einsatz befinden sich heute jedoch nur die Verfahren zum Recycling von Compact-Discs (siehe Abschnitt 3.3.1 CDs, Seite 23) [17].

Rein mechanische Verfahren führen meist nur zu einer teilweisen Entschichtung. Zur Trennung von Metallen und Kunststoffen lassen sich auch ihre sehr unterschiedlichen thermischen Eigenschaften ausnutzen. So macht sich zum Beispiel das Kryogen-Verfahren der *Messer-Griesheim AG* [18] die Tatsache zunutze, dass sich Kunststoffe, wie z. B. ABS¹ und Polycarbonat, im Ausdehnungskoeffizienten um den Faktor acht von denen der Metalle unterscheiden. Zusätzlich wird die Versprödungsfähigkeit der Kunststoffe ausgenutzt. Durch Kälte versprödeter Kunststoff kann durch Schlag- oder Prallbeanspruchung zerkleinert werden. Die

Abkühlung des Verbundes mit flüssigem Stickstoff führt bei ca. -110 °C zu einem hohen Schubspannungsgradienten an der Grenzfläche Kunststoff-Metall. Die metallischen Schichten kontrahieren sehr viel weniger als der darunter liegende Kunststoff. Dadurch reißt der Verbund auf. In einer modifizierten Hammermühle wird das gekühlte Produkt dann aufgeschlossen. Eine sortenreine Trennung der Bestandteile ist mit üblichen Techniken möglich. Das erhaltene Metallgemisch besteht vorwiegend aus Kupfer, Nickel und Chrom. Es kann in der Metallindustrie weiter verwertet werden. Da keine Lösemittel oder Strahlmaterialien benutzt werden, bleibt als zu entsorgender Rest ein kleiner Anteil an staubförmigen Mahlverlusten zurück. Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb sind auch hier wieder ausreichende Mengenströme. Das zurückgewonnene Kunststoffrezylat hat bereits Abnahmeprüfungen bei Automobilherstellern bestanden. Eine erste Anlage ist 1996 errichtet worden.

Die „Selektive Vermahlung“, entwickelt vom Forschungsinstitut *Kunststoff und Recycling (FKuR)* in Willich [19], nutzt ebenfalls die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften von Kunststoff und Metall. Möglich ist auch eine Kombination aus chemischen und mechanischen Prozessen [20]. Die zerkleinerten, metallisierten Kunststoffteile werden mit einem organischen Lösemittel behandelt. Der Kunststoff löst sich teilweise auf oder wird zumindest angequollen. Dabei wird der Verbund zwischen Metall und Kunststoff aufgehoben, gelöster Kunststoff kann durch Filtrieren abgesondert werden. Durch Ausfällungsreaktionen erhält man den Kunststoff in fester Form zurück. Metall kann ebenfalls rein erhalten werden. Nachteilig ist der große Lösemittelanteil im zurückgewonnenen Kunststoff. Die Metalle liegen im Gemisch vor. Das Verfahren ist relativ teuer.

3.2.1.2 Lackierte Kunststoffe

Schwieriger als bei metallisierten Kunststoffen ist die Verbundtrennung bei lackierten Kunststoffen, denn Substrat und Beschichtung sind vergleichsweise ähnlich. Daher sind übliche Entlackungsverfahren, wie sie zum Beispiel bei lackierten Metallen angewandt werden, meist ungeeignet. Chemische Verfahren, wie Ablaugen oder Abbeizen, schädigen das Substrat, thermische Verfahren führen zu einem Verkohlen beider Komponenten und die mechanische Abtragung durch Strahlen führt nicht zum Erfolg, weil die dünnen, hartelastischen Lackschichten verschleißbeständiger sind als das Kunststoffsubstrat.

Realisiert ist das **Abfiltern von Lackpartikeln aus der plastifizierten Kunststoffschmelze**. Dabei wird der lackierte Kunststoff erst in einem Extruder aufgeschmolzen und während der Extrusion durch ein feinmaschiges Sieb gepresst. Die Lackpartikel werden dabei zurückgehalten oder auf eine Größe zerrieben, die für die Qualität des Rezyklats nicht schädlich ist. Es wird keine zusätzliche Energie verbraucht, da eine Extrusion ohnehin notwendig ist. Jedoch ist die benötigte Filterfläche, besonders bei dünnwandigen Teilen, sehr groß. Für ein Kilogramm wird eine freie Filterfläche von ca. 10 cm² benötigt. Da mit kleinen Maschenweiten (40 µm) gearbeitet werden muss, beträgt die freie Siebfläche nur etwa ein Zehntel der gesamten Siebfläche. Eine Tonne Material [21] erfordert also eine Siebfläche von 10 m². Auch bei mehrfacher Verwendung ist das Siebmaterial ein hoher Kostenfaktor. Da bei engmaschigen Sieben mit hohen Drucken gearbeitet werden muss, tritt zusätzlich durch

¹ ABS = Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer

die starke Scherung eine Degradation des Polymers auf. In der Praxis ist daher eine weitgehende Entfernung der Beschichtung vor der Extrusion erforderlich.

Mit starken Scherkräften kann man den Lack/Substrat-Verbund selektiv zerkleinern. Beim Einwirken starker Scherkräfte bilden sich Bruchzonen bevorzugt am Übergang zwischen zwei unterschiedlich duktilen Materialien aus. Die Haftung der hartelastischen Lackschicht wird verkleinert und sie kann durch weitere Prozesse, wie z. B. schlagende Bearbeitung, abgetrennt werden. Bei der Bearbeitung in einer Kegelpresse, wie sie auch zur Aufbereitung mineralischer Rohstoffe benutzt wird, und anschließender Behandlung in einer Stiftmühle können z. B. 80-90 Prozent des Lackes aus dem Verbund entfernt werden. Verbleibende Lackreste werden dann in einer Schmelzefiltration entfernt. Diese Verfahren haben jedoch nur einen geringen Durchsatz und benötigen relativ große und damit teure Anlagen. Ob bei der Streckung in der Presse das Substrat geschädigt wird und welche Substanzverluste es gibt, ist nicht bekannt [21].

Auch die Übertragung von in der Metallentlackung eingesetzten Strahlverfahren ist denkbar. Leichte Kunststoffteile weichen jedoch dem Strahl Druck aus, bevor es zu einer abrasiven Wirkung kommt. Als Modifikation wird die sogenannte Schleuderradtechnik untersucht, bei der einzeln beschleunigte Strahlpartikel auf das Material prasseln. Die abrasive Wirkung hängt dabei vom Strahlwinkel ab. Um bei den verschleißfesten Lackschichten einen Abtrag zu erzielen, müssen die Partikel nahezu senkrecht auf die Oberfläche treffen. Für diese Technik ist neben mechanischer Energie ein Strahlmittel, das möglichst beim Aufprall oder beim Zusammenprall mit anderen Strahlpartikeln selbst verbraucht wird. Neben der Eintragung von Fremdpartikeln entsteht ein deutlicher Materialabtrag vom Substrat [21].

Bei lackierten Stoßfängern von Automobilen gelingt ein vollständiges Abtragen der Lackschichten mit abrasiven Partikeln nach dem Schleuderstrahlverfahren. Über einen Magnetabscheider können die eingesetzten ferromagnetischen Strahlpartikel von den zu entsorgenden Lackrückständen abgetrennt und erneut eingesetzt werden. Die zu entsorgende Restmenge wird hier also durch das Entschichtungsverfahren nicht erhöht.

Kombiniert man mechanische mit chemischen Entlackungsverfahren, kann man den Lack durch relativ schwache Reibkräfte entfernen. Dazu werden die zu entlackenden Bauteile auf ca. 8 mm zerkleinert, um die Lackoberfläche und die Angriffsfläche für das alkalische Entlackungsmittel zu vergrößern. Das entstaubte Mahlgut wird mit einem speziellen Lösungsmittel versetzt, der den Lack aufquellen lässt. Einen gleichmäßigen, allseitigen und schonenden Abrieb des angelagerten Lackes kann man z. B. in Fliehkraft-Gleitschleifanlagen erreichen. So wird im sogenannten Friktionsabscheidemischer das Material durch mit hohen Umlaufgeschwindigkeiten laufende Mischwerkzeuge beschleunigt, die einzelnen Materialströme werden gegeneinander geführt und somit einer intensiven mechanischen Beanspruchung unterzogen. Vor der anschließenden Fest-Flüssig-Trennung wird das Mischgut mit weiterem Entlackungsmittel verdünnt, um eventuell noch anhaftende Lackreste abzulösen [22].

Trotz des erforderlichen Aufwands für die Entlackung ist eine Lackierung Voraussetzung für eine werkstoffliche Verwertung gebrauchter Altkunststoffe, da die Lackierung die Alterung

der Kunststoffe durch UV-Degradation und andere Mechanismen weitgehend reduziert. Aus nicht lackierten Kunststoff-Altteilen lassen sich meist nur minderwertige Werkstoffe bzw. Rohstoffe zurückgewinnen.

3.2.2 Beschichtete Metalle

3.2.2.1 Metallische Schichten

Aufbringen metallischer Schichten

Auf leitfähigen Substraten können zahlreiche Metalle, insbesondere edlere Metalle wie Gold, Silber, Chrom, Cadmium oder Kupfer, mit galvanischen Verfahren abgeschieden werden. Die Metalle liegen dabei als Metallsalze in wässriger Lösung vor. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung scheiden sich die Metalle dann an den Werkstücken ab. Solche Schichten dienen z. B. als Schmuckschichten, Korrosionsschutzschichten bzw. Leitbahnen in der Elektronik und in der Elektrotechnik. Einige Metalle, z. B. Nickel, Kupfer, Silber oder Zinn, können auch stromlos abgeschieden werden. Dabei erfolgt die Abscheidung durch eine chemische Reaktion. Stromlose Verfahren erlauben im Gegensatz zu den galvanischen Beschichtungen eine gleichmäßigere Beschichtung auch an Ecken und Kanten, da dort keine Inhomogenitäten wie bei elektrischen Feldern auftreten. Dadurch können auch dreidimensionale Bauteile gleichmäßig beschichtet werden. Zusammenfassend spricht man bei chemischen und galvanischen Beschichtungen auch von „nassen“ Verfahren, da die Abscheidung aus einem chemischen Bad erfolgt.

Bei den modernen „trockenen“ Verfahren geschieht die Abscheidung des Beschichtungsmaterials aus der Gasphase. Diese Prozesse müssen im Vakuum oder bei sehr niedrigen Drücken durchgeführt werden und erfordern daher einen größeren anlagentechnischen Aufwand. Je nachdem, wie der „Dampf“ erzeugt wird, unterscheidet man zwischen physikalischer Abscheidung aus der Dampfphase (PVD; physical vapour deposition) und der chemischen Abscheidung aus der Dampfphase (CVD; chemical vapour deposition). Häufig werden Mehrschichtsysteme erzeugt, bei denen Zwischenschichten als Haftvermittler oder auch zum Ausgleich von Unebenheiten bzw. Fehlstellen des Substrates dienen.

Abtragen metallischer Schichten

Bei der elektrochemischen Beschichtung anfallende fehlerhafte Teile und beschichtete Kontaktelemente werden entmetallisiert. Herkömmliche Verfahren sind ökonomisch und ökologisch aufwendig. Sowohl wirtschaftliche Gründe als auch die Vorgaben des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes verlangen die Schließung von Stoffkreisläufen und die Vermeidung bzw. Minimierung von nicht verwertbaren Abfällen. Prinzipiell kann man metallische Schichten auf drei Arten entfernen [23]:

- mechanisch durch Schleifen, Fräsen etc.,
- nasschemisch, z. B. durch Tauchen in Säure,
- elektrochemisch mit an Deck- beziehungsweise Grundwerkstoff angepassten Elektrolyten.

Im Detail sind zu den einzelnen Verfahren folgende Anmerkungen zu machen:

- Mechanisches Entmetallisieren empfiehlt sich besonders bei dicken Schichten (> 250 µm); eine vollständige

ge Entfernung der Deckschicht ist dabei jedoch nicht immer gewährleistet. Der Abrieb kann metallurgisch weiterverwendet werden.

- b) Galvanisierte Bauteile lassen sich bei relativ unedlen Metallen wie z. B. Zink durch Tauchen in eine Säurelösung vom Überzugsmetall befreien. Bei Mineralsäuren geschieht die Metallauflösung unter Wasserstoffentwicklung. Zugesezte Komplexbildner können die Löslichkeit bestimmter Metalle erhöhen. Wenn das abzulösende Metall bevorzugt gebunden wird, wird es gegenüber dem Substratmaterial unedler. Da der Ablöseprozess vom pH-Wert abhängig ist, werden Puffersubstanzen zugesetzt. Stahlsubstrate sind z. B. im alkalischen Milieu passiviert. Weitere Zusatzstoffe für eine chemische Entmetallisierung sind Inhibitoren, die den Angriff des Oxidationsmittels auf die Basis kinetisch hemmen, und Aktivatoren, die die Auflösung des Schichtmetalls beschleunigen. Bei den stromlosen Tauchverfahren wird jedoch das Substrat mehr oder weniger stark angegriffen. Diese Verfahren sind einfach durchzuführen, leicht zu überwachen und benötigen keine aufwendigen Anlagen. Das abgelöste Metall wird in der Lösung angereichert, das Oxidationsmittel wird verbraucht. Um die Standzeiten solcher Bäder zu verlängern und Stoffkreisläufe zu schließen, muss die Metallkonzentration konstant gehalten werden und das Oxidationsmittel nachdosiert werden.
- c) Elektrochemische Verfahren sind exakt zu steuern und gut an das jeweilige Schicht/Substrat-System anzupassen. Sie ermöglichen, dass das Metall anodisch abgelöst wird. Chemikaliengabe und Anreicherung des Oxidationsmittels im Elektrolyten entfallen. Die Standzeit solcher Bäder ist theoretisch unbegrenzt. Geeignete Bedingungen erlauben sogar eine Abscheidung des abgelösten Metalls an der Gegenelektrode. Damit ist eine Umkehrung der Beschichtung erreicht.

Verwertung im Hüttenwesen

In der **Stahlhütte** werden die Stahlbestandteile recycelt. Alle anderen nichtflüchtigen Materialien gehen in die Schlacke. Ein Recyceln weiterer Materialien, beispielsweise von Edelmetallen, ist in der Stahlhütte nicht möglich. Kupfer, Zinn und Blei sind aus verschiedenen Gründen nur in sehr kleinen Mengen akzeptierbar.

Bei einer Verwertung in der **Kupferhütte** werden nicht nur Kupfer, sondern alle edleren Metalle recycelt. Unedle Metalle und nichtmetallische Anteile gehen als Oxid in die Prozessschlacke.

Nicht zurückgewonnene Wertstoffe in der Schlacke gehen dem Wirtschaftskreislauf als Rohstoffe verloren und müssen anderweitig aufwendig aus Primär-Rohstoffen gewonnen werden. Dabei geht nicht nur die bereits erbrachte Wertschöpfung verloren, sondern es werden auch vermehrt Energie und Ressourcen verbraucht. Gewinnt man diese Rohstoffe aus der Schlacke zurück, z. B. mit dem reduzierenden Schmelzen nach dem **RedMelt-Verfahren** [24], spart man nicht nur wertvolle Ressourcen, sondern gewinnt auch noch die von Schadstoffen befreiten silicatischen Schlackebestandteile zurück.

Wird zinkhaltiger Staub oder Schlamm als Abfall deklariert, muss dieser auf eine Sondermüll-Deponie verbracht wer-

den. Das ist teuer und ökologisch nicht erwünscht. Anders als beim Staub aus dem Elektro-Schmelzofen enthält der Staub aus Gebläse- oder Sauerstoff-Schmelzöfen zu wenig Zink, um als gefährlich eingestuft zu werden. Existierende Verfahren zur Wiedergewinnung von Zink benötigen jedoch ausreichende Zinkkonzentrationen, um wirtschaftlich arbeiten zu können.

Zink- und zinnhaltige Stahlabfälle sind hochwertige Rohstoffe für die Stahlerzeugung, jedoch ist Zink umweltbelastend und im Hochofenprozess störend. Zink verläßt den Prozess der Stahlerzeugung fast ausschließlich im Staub. Im Hochofen beeinträchtigt es im sogenannten Zinkkreislauf die Eisengewinnung durch Bildung von Ablagerungen und den Verbrauch von Energie durch endotherme Reduktionsreaktionen des Zinkoxids. Zink verursacht daher z. T. erhebliche Mehrkosten. Wenn galvanisierter Schrott vor dem Einsatz in der Stahlerzeugung entzinkt wird, kann der Erlös für das zurückgewonnene Zink möglicherweise die Mehrkosten für die Entzinkung auffangen [25].

Versuche, Zink (und Blei) aus den bei der Verhüttung anfallenden Stäuben und Schlämmen auf dem Sinterband zu entfernen, gelangen in mehreren Großversuchen mit Ausbeuten von mehr als 90 Prozent. Dazu wurde der Schlamm durch Lagerung an Luft getrocknet und dann zerteilt. Das Granulat musste ausreichend Kohlenstoff enthalten und in dünner Schicht auf dem Rost ausgebreitet werden. Zink und Blei reicherten sich im Staub der Abgasanlage in den kleineren Kornfraktionen (< 10 µm) an. Vorhandene Elektrofilter erfassten diesen Anteil jedoch nur unzureichend. Eine Konditionierung des Abgases brachte keine Abhilfe.

Zinn bereitet keine Probleme in der Schmelze, beeinträchtigt jedoch die Qualität des Stahls und stört den Walzprozess. Daher wird von Walzwerken nur eine bestimmte Menge an Zinn toleriert. Weißblechschrott (mit Zinn beschichtetes Stahlblech) wird anodisch entzinkt. Der Weißblechschrott wird als Katode geschaltet, das Zinn geht als Stannat in Lösung und wird an der Anode wieder als Zinn-Metall abgeschieden. Das entzinnete Stahlblech gelangt als Schrott in die Stahlproduktion. Früher wurde vom losen Weißblechschrott erst der Lack entfernt, dann entzinkt und anschließend der Stahlschrott verpresst. Wegen der hohen Kosten und weiterer negativer Begleiterscheinungen, wie z. B. einem schlammförmigem Problemstoff aus der Entlackung, wurde das Verfahren modifiziert. Der Weißblechschrott wird heutzutage gemahlen, gepresst und in ein Alkali-Elektrolysebad gegeben. In einer Sodalösung wird entzinkt, ohne gleichzeitig die Farben und Lacke zu entfernen. Diese werden bei der Weiterverwendung des Stahlschrottes im Stahlwerk verbrannt. Der Restzinn-Gehalt liegt unter 0,02 Prozent.

Andere, früher übliche Verfahren zur Entfernung des Zinns durch Abschmelzen oder Oxidieren sind wegen des hohen Energiebedarfs unwirtschaftlich. Die Entzinnung mit Hilfe von Chlorgas wird aus Umweltschutzgründen nicht mehr praktiziert. Die chemische Behandlung mit Alkalien und Oxidationsmitteln ergibt Natriumstannat, das direkt oder nach Umwandlung zu Zinnoxid vermarktet werden kann.

3.2.2.2 Lackschichten

Zu unterscheiden ist zwischen lackierten Bauteilen, die nach der Gebrauchsphase entsorgt werden und solchen, deren Funktion oder Lebensdauer durch Erneuern der Beschich-

tung erhalten bzw. verlängert werden soll. Metallschrott mit Lackanteilen gelangt eigentlich immer in die Metallhütte, wobei im Schmelzofen der (organische) Lackanteil verbrennt, anorganische Anteile wie Pigmente und Füllstoffe verbleiben in der Schlacke. Für eine gefahrlose Verbrennung der organischen Anteile sind neben ausreichend hohen Temperaturen aufwendige Abgasreinigungsanlagen erforderlich. Diese sind jedoch heute bei allen Anlagen schon aus immisionsrechtlichen Gründen vorhanden. Zur Aufbereitung bzw. zur Entsorgung der Filterstäube solcher wurden im Rahmen dieser Studie keine Recherchen vorgenommen. Für eine Wieder- oder Weiterverwendung der Bauteile wird (selektiv) entlackt. Dies geschieht mit chemischen, thermischen oder mechanischen Verfahren.

Zur chemischen Entlackung sind Warm-/Heißentlackungsmittel, Lacklöser und Entschichtungsmittel gebräuchlich. Warm- und Heißentlackungsmittel enthalten organische Quellmittel, Lauge und Wasser. Sie sind, außer für Leichtmetallteile, Standardprodukte. Die Quellmittel, meist Glykol-Derivate, weichen den Lackfilm auf, so dass die wässrige Lauge eindringen und zersetzen kann. Die Vorteile sind: geringe Kosten, lange Standzeit des Bades, moderate Emissionen. Leichtmetalle und zinkhaltige Teile werden jedoch durch Laugen aufgelöst. Daher werden für diese sogenannte Lacklöser benutzt. Das sind organische Mischungen ohne oder mit wenig Wasser. Den größten Marktanteil haben derzeit Lacklöser auf NMP²-Basis. Das vorwiegende Einsatzgebiet ist das Entschichten von Aluminiumprofilen.

Saure Entschichtungsmittel dienen speziell zum Entfernen reiner Epoxidpulverlacke der im Automobilbau derzeit üblichen KTL-Schichten (Kathodische Tauch-Lackierung).

Bei allen chemischen Verfahren fallen verbrauchte und verunreinigte Chemikalien an, die mit erheblichem Aufwand aufbereitet oder entsorgt werden müssen. Der Lack wird nicht vollständig aufgelöst, sondern bildet einen verfahrenstechnisch schwer zu handhabenden Lackschlamm. Für Lackschlämme gibt es zur Zeit noch keine Aufbereitungsverfahren. Getrockneter Lackschlamm kann jedoch in der Zementindustrie als Ersatzbrennstoff dienen. Neben der Abfallproblematik besteht auch eine z. T. erhebliche Schadstoffbelastung am Arbeitsplatz. Bei neueren Anlagen zur chemischen Entlackung wird versucht, die Stoffkreisläufe durch Einsatz regenerierbarer Chemikalien zu schließen und die Schadstoffbelastung am Arbeitsplatz durch Einsatz weniger giftiger Substanzen zu vermindern.

Die thermische Entlackung geschieht im Ofen oder im Wirbelbett. Bei mäßigen Temperaturen wird die Lackschicht großflächig abgedampft, bei hohen Temperaturen wird sie verbrannt. Die sich bildenden Dämpfe werden abgesaugt und bei modernen Verfahren einer Abgasnachverbrennung unterzogen. Eine vollständige Absaugung der Dämpfe ist jedoch meist nicht möglich. In jedem Fall fallen Filterstäube an, die als Sonderabfall entsorgt werden müssen. Bei den thermischen Verfahren wird darüber hinaus das Bauteil durch die Wärmeeinbringung mehr oder weniger stark geschädigt. Dafür fallen weder Strahlmittel noch aufwendig zu entsorgende Chemikalien an.

Mechanische Entlackungsverfahren sind zum einen das Schleifen oder Bürsten, zum anderen die Strahlverfahren.

Erstere lassen sich schlecht automatisieren, sind also für große Mengen nicht anwendbar. Zudem gelingt entweder der Abtrag der Deckschichten nur unvollständig oder die Substratoberfläche wird stark geschädigt.

Bei den Strahlverfahren wird das Strahlmittel, z. B. Sand, Stahl- oder Glaskugeln, aber auch Wasser, mit hohem Druck auf die zu behandelnde Oberfläche geschleudert. Durch das Auftreffen der Strahlpartikel können auch Partikel in die Substratoberfläche eindringen. Wegen der erheblichen Staubbelastung muss in geschlossenen Kabinen gearbeitet werden, beim sogenannten Freistrahlen, wie es u. a. in der Fassadenreinigung eingesetzt wird, müssen der gesamte Arbeitsbereich eingehaust sein und Schutzkleidung und Atemschutzfilter getragen werden.

Wenn sich das Strahlmittel von den Deckschichtpartikeln trennen lässt, kann es mehrfach verwendet werden, auch die abgelöste Schicht kann dann einer Wiederverwendung zugeführt werden. Anderenfalls gibt es erhebliche Mengen zu entsorgender verunreinigter Strahlmittel.

Großtechnisch realisiert ist die Wasserstrahlreinigung bzw. -entlackung von Flugzeugen, letzteres zur Vorbereitung einer Neulackierung.

3.2.2.3 Metallträgerkatalysatoren

Autoabgaskatalysatoren mit Metallträgern haben zur Zeit etwa einen Anteil von 5 bis 10 Prozent [26]. In Zukunft wird ihr Anteil jedoch wegen technologischer Vorteile (besseres Ansprechverhalten, höhere Temperaturbeständigkeit) zunehmen. In den Metallträgerkatalysatoren wird anstelle des wabenförmigen Keramikkörpers (Monolith, siehe Abschnitt 3.2.4) eine Metallfolie als Träger für die Edelmetalle verwendet. Sie ist in glatten und gewellten Lagen abwechselnd geschichtet und wird nach einem besonderen Verfahren gewickelt.

Bisher wurden Metallträgerkatalysatoren als ganzes Bauteil in die Edelmetall-Rückgewinnung eingebracht. Neben den hohen Kosten war die Edelmetallausbeute nur gering. Im übrigen gingen sämtliche Metallfraktionen, bestehend aus der NE-Metallhülle und der aufgewickelten Trägerfolie, bei dieser Aufarbeitung verloren.

Die EAR European Autocat Recycling GmbH in Alzenau hat ein Verfahren entwickelt, mit dem Metallträgerkatalysatoren mechanisch in ihre Bestandteile getrennt werden können [26]. Bei dieser mechanischen Trennung der Fraktionen bleiben alle Hauptbestandteile im Wertstoffkreislauf. Der „Wash-Coat“, die die Edelmetalle tragende keramische Beschichtung, wird nach Abtrennung in die Edelmetallraffination eingebracht. Auch die Hülle und die Trägerfolie lassen sich voneinander trennen und verwerten.

Im ersten Schritt werden im Shredder komplette Abgaskatalysatortöpfe ohne Abgasrohre so zerkleinert, dass sich die Fraktionen bereits voneinander lösen. Als Produkte erhält man eine Stahlfraktion und den Wash-Coat, der die Edelmetalle enthält. Die Stahlteile werden anschließend magnetisch voneinander getrennt und die Trägerfolie einer mechanischen Nachbehandlung unterzogen. Dadurch werden restliche Anhaftungen von Wash-Coat und eventuelle Einschlüsse abgetrennt. 95 Prozent des Platins und 75 Prozent des Rhodiums werden dem Kunden bei diesem Verfahren vergütet. Bei früher eingeführten hydro- und pyro-

² N-Methylpyrrolidon: 1-Methyl-2-pyrrolidinon

metallurgischen Verfahren betrug die Rückgewinnungsquote 75 bis 80 Prozent für Platin und 50 bis 60 Prozent für Rhodium. Im Gegensatz zu anderen Verfahren geht die Trägerfolie bei der Aufarbeitung nicht verloren, sondern kann zum Marktpreis veräußert werden. Der höhere technische Aufwand für die Aufbereitung von Metallkatalysatoren wird durch die höhere Edelmetallvergütung für den Kunden ausgeglichen.

1995 hat EAR bereits mehr als 100 Tonnen Metallkatalysatoren verarbeitet, von denen ein großer Teil eingelagerte Produktionsabfälle der Metallkatalysator-Hersteller waren.

3.2.3 Beschichtetes Glas

Moderne Fenstersysteme sollen den Energieverlust durch die Scheiben nicht nur vermindern sondern zusätzlich Stromkosten reduzieren helfen, indem sie das Tageslicht energetisch noch besser ausnutzen. Dazu muss der k-Wert, der Wärmedurchgangskoeffizient, möglichst klein sein. Dies wird durch die verschiedensten Kombinationen von

- mit inerten Gasen gefüllten Doppelverschiebungen,
- evakuierten Doppelverschiebungen,
- von innen IR-sperrenden Beschichtungen,
- elektrochromen, photochromen, thermochromen Beschichtungen,
- Verwendung von Aerogelen, Xerogelen

erreicht. In der Entwicklung befinden sich zur Zeit die sogenannten „intelligenten“ Fenstersysteme mit z. B. diffraktiven, holografischen oder refraktiven Tageslicht-Deflektoren.

Die Vielzahl an Materialien, die in modernen Fenstern enthalten sein können, spiegelt die Probleme bei einer Wiederverwendung oder Verwertung wider. Nur sortenreine Scheiben(-systeme) genügen daher einer problemlosen Aufarbeitung. Da die genaue Zusammensetzung aber oftmals ein Firmengeheimnis ist, ist eine Zusammenarbeit mit den Herstellern bzw. eine Verwertung durch diese unabdingbar. Erste Sammel- und Verwertungssysteme bestehen für Aluminium- und Kunststoffenster, wobei die Verschiebungen noch weitgehend konventionell sind und daher nicht so hohe Anforderungen an den Verwertungsprozess stellen.

Tabelle 5
Annahmekriterien für Flachglasscherben (klares Floatglas)³

Maximaler Anteil an Guss- und Farbgläsern:	5 %
Fremdbestand pro Tonne Glasscherben:	
Magnetisierbare und sonstige Metalle: (außer Aluminium)	5 Gramm
Aluminium, Stanniol	5 Gramm
Steine, Porzellan, Keramik	
> 10 Millimeter	-
< 10 Millimeter	20 Gramm
Holzteile	
> 20 Millimeter	-
< 20 Millimeter	15 Gramm
Papier	15 Gramm
Andere organische Bestandteile (z. B. Kunststoff)	
> 15 Millimeter	-
< 15 Millimeter	15 Gramm

³ Sekundär-Rohstoff (11)/1997, S. 399-400

Auch bei der Verwertung von Flachglasscherben ist die Abwesenheit von störenden Fremdstoffen zwingende Voraussetzung. So gelten für klares Floatglas die Annahmekriterien gemäß Tabelle 5. 1997 gab es in Deutschland zehn Aufbereitungsanlagen für Flachglas.

Das Altglas wird zuerst von glasfremden Stoffen befreit und vorgebrochen, Verunreinigungen werden manuell aussortiert, magnetisierbare Metalle werden über einen Metallabscheider ausgesondert. Danach erfolgt der Feinbruch auf eine Korngröße bis zu 45 mm, Feinstkorn und Folienstücke werden abgesiebt. Nichteisen-Metalle werden mit einem NE-Metallabscheider und noch vorhandene Folienstücke an einer Absaugstation entfernt. Wegen der hohen Qualitätsanforderungen, die die Hauptabnehmer-Branche Auto- und Bauindustrie stellen, ist die Aufarbeitung jedoch noch nicht wirtschaftlich. Bei den beiden deutschen Flachglasherstellern werden heute bis ca. 20 Prozent Flachglas-Scherben in der Produktion von Neuware eingesetzt. Eine Umwandlung von Flachglas-Scherben zu Behälterglas ist nicht lohnend, da in Deutschland durch das Duale System ausreichend Behälter-Altglas zur Verfügung steht.

Autoglas wird zum größten Teil noch mit der sogenannten Shredder-Leichtfraktion auf (Hausmüll-)Deponien abgelagert. Da Glasschäden an Automobilen von den Versicherungen übernommen werden, ist der Anteil demontierter Autoscheiben aus Altfahrzeugen als Ersatzteil vernachlässigbar gering.

Eine Verwertung von Autoglas gestaltet sich schwierig, da keine technisch optimalen Lösungen zum Herauslösen von Fremdstoffen und Verunreinigungen existieren. Die genaue Zusammensetzung der Fahrzeugscheiben ist meist unbekannt. Daher ist die für eine Verwertung erforderliche Sortenreinheit nicht gewährleistet. Zur Zeit übersteigen die Kosten einer Aufbereitung die Kosten der Primärrohstoffe [28]. Für moderne geklebte Front- und Heckscheiben existieren noch keine Demontageverfahren. Der manuelle Ausbauaufwand liegt bei etwa 60 Minuten gegenüber etwa zwei Minuten für herkömmlich verbaute Front- und Heckscheiben.

Um die Verwertungsziele für Automobilaltglas, die für Ende 2000 bei einer Verwertungsquote von 60 Prozent liegen (1997: 30 Prozent), werden vorwiegend die Front- und Heckscheiben ausgebaut, die zusammen etwa 50 Prozent des gesamten Glases eines Kraftfahrzeugs ausmachen. Bei Autoscheinwerfern wird Glas immer mehr durch Kunststoff ersetzt, bei den Scheiben ist eine solche Entwicklung alleine aus Gewichtsgründen auch zu erwarten, so dass kaum in Verwertungstechniken investiert wird.

Die zum 1. April 1998 in Kraft getretene Altautoverordnung [29] hat bisher nicht zu einer Zunahme der Verwertung, sondern zu einem verstärkten Export von Altautos geführt. Unternehmen, die nach der Altautoverordnung als zertifizierte Verwerter anerkannt sind, werden erst dann weiter investieren, wenn sich der Aufwand für die Zertifizierung amortisiert hat.

Bildschirmgläser aus Monochrom- und Farbbildröhren (Kathodenstrahlröhren, CRT's) haben einen unterschiedlichen Aufbau. Monochrombildröhren bestehen aus einer einheitlichen, bleihaltigen Glassorte. Die Bildschirminnenseite ist gleichmäßig mit Leuchtstoffen beschichtet. Farbbildröhren sind komplexer aufgebaut. Für Schirm- und Konusglas wer-

den hier verschiedene Gläser eingesetzt. Das Schirmglas (Vorderglas) besteht aus einer barium- und strontiumhaltigen Glassorte, das Konusglas enthält Blei. Schirm- und Konusglas sind nicht direkt miteinander verschweißt, sondern über Glaslot miteinander verbunden.

Alle Aufbereitungs-Verfahren beruhen meist auf den folgenden Verfahrensschritten:

1. Absprennen des Halsglases, Entfernung des Strahlensystems
2. Trennung von Schirm- und Konusglas
3. Ausknöpfen der Metallmaske
4. mechanisches oder chemisch-physikalisches Entfernen der Leuchtstoffe oder der gesamten Leuchtstoff-Al-Kohlenstoffschicht.

Prinzipiell existieren vier verschiedene Verfahren zur Aufbereitung von Bildschirmen:

1. Manuelle Entfernung der Leuchtschicht im Anschluss an das thermische Aufspalten der Bildröhre im Trockenverfahren. Die manuelle Abbürstung verhindert wirtschaftliches Arbeiten, da sie nicht automatisierbar ist.
2. Entfernung der Leuchtschicht in einer rotierenden Trommel unter Zugabe von Wasser. Dieses Verfahren wird häufig eingesetzt, da die Anlagenkosten relativ klein sind. Doch bleibt ein großer Anteil an Leuchtschicht in den Scherben zurück, weitere Reinigung führt durch die Mahlwirkung zu einer immer feineren Glasfraktion. Der entsorgungspflichtige Sondermüllanteil erhöht sich rasch von 0,003 bis 0,009 Kilogramm auf bis zu 0,05 Kilogramm je Bildröhre.
3. Entfernung der Leuchtschicht durch mehrstufiges Spritz-Wasch-Verfahren. Dieses Verfahren funktioniert gut nur für komplette Bildschirm-Frontgläser, die genau positioniert sind. Es ist jedoch für Glasbruch und Scherben nicht geeignet.
4. Nassreinigung im Tauchverfahren mit Ultraschall-Unterstützung. Nach der thermischen Trennung von Front- und Konusglas durchfährt das Frontglas mit der Leuchtschicht drei Zonen in einer Durchlaufreinigungsanlage. In Zone 1 führt der Ultraschall zu einer sicheren Entfernung der Leuchtschicht (auch bei Scherben, die sich gegenseitig überdecken können); die Leuchtschicht aus dem Waschwasser wird durch Filtrations- und Flotationstechniken gesäubert. Das Wasser wird nach einer Vakuumdestillation dem Prozess erneut zugeführt. In Zone 2 werden die Mattscheiben im Anschluss an die Tauchreinigung durch Abspritzen von der locker aufschwimmenden Leuchtschicht befreit. Anschließend werden die gereinigten Frontscheiben über Luftdüsen abgeblasen. Der Restmüll ist nahezu glasfrei! Die Bleiglasreste haben eine hohe Akzeptanz bei Sekundärrohstoff-Verarbeitern, da sie eine hohe Reinheit aufweisen.

3.2.4 Beschichtete Keramik

Bereits 1987, als in Europa Autoabgaskatalysatoren gerade erst eingeführt wurden, gingen 35 Prozent des Platinverbrauchs in der westlichen Welt in Autoabgaskatalysatoren. Bei Rhodium lag dieser Anteil sogar bei 73 Prozent. In den Vereinigten Staaten sprach man in diesem Zusammenhang von einer „Mine above ground“ oder „Mine on wheels“.

Herkömmliche Autoabgaskatalysatoren haben Keramik als Trägermaterial, moderne sind meist Metallträgerkatalysatoren (siehe Abschnitt 3.2.2.3, Seite 18). Keramik-katalysatoren haben bei der Verwertung den entscheidenden Vorteil, dass sich auf Grund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften die Hülle leicht vom Trägermaterial trennen lässt. Wegen einer Reihe von technischen Vorteilen, u. a. schnelleres Erreichen der Betriebstemperatur und besserer Temperaturbeständigkeit, nimmt der Einsatz von Metallträgerkatalysatoren, die bisher vorwiegend als Vorkatalysatoren eingesetzt wurden, immer mehr zu.

Bei den Katalysatoren mit keramischem Trägermaterial unterscheidet man zwischen den häufiger eingesetzten Monolithen, aus einem Stück mit feinen, meist wabenförmigen, Kanälen versehenen Trägern und Pellets oder Schüttgutkatalysatoren. Das sind kleine Keramik-Kügelchen, die nach Beschichtung mit den Edelmetallen in den Auspufftopf „hineingeschüttet“ werden. Prinzipiell gibt es zwei Aufbereitungsverfahren [30]:

- Hydrometallurgische und
- pyrometallurgische Aufarbeitung.

Bei der hydrometallurgischen Aufarbeitung sind zwei Wege möglich. Man kann z. B. mit Natronlauge unter Druck oder mit Schwefelsäure den Träger in Lösung bringen. Aus dem verbleibendem Schlamm werden dann die Edelmetalle zurückgewonnen. Dieses Verfahren eignet sich besonders für die Pellets, die jedoch kaum noch eingesetzt werden. Probleme mit Bleigehalten, wie es sie in den USA gab, sind in Deutschland und Europa wegen der besseren Verfügbarkeit von bleifreiem Benzin und wegen strengerer Kontrollvorschriften nicht aufgetreten. Alternativ löst man die Edelmetalle z. B. mit Königswasser (Gemisch aus konz. Salpetersäure und konz. Salzsäure im Volumenverhältnis 1:3) vom Träger ab. Die entstehende Lösung wird dann in mehreren Schritten aufkonzentriert, bevor die Edelmetalle durch Fällverfahren oder elektrolytische Verfahren zurückgewonnen werden.

Bei der pyrometallurgischen Aufarbeitung werden die Katalysatoren zusammen mit einem Sammlermetall, z. B. Eisen, geschmolzen. Der Träger wird verschlackt, die Edelmetalle werden im Sammlermetall gebunden und in mehreren Umläufen angereichert. Wegen der hohen Schmelzpunkte der Keramikträger sind zur Erreichung der erforderlichen Temperaturen Schacht- oder Hochtemperaturöfen erforderlich. Zu den Hochtemperaturöfen zählen z. B. Plasma- oder Lichtbogenöfen. Die im Sammlermetall gebundenen Edelmetalle werden nach Erreichen einer ausreichenden Konzentration nach den für die Gewinnung der Pt-Metalle üblichen Verfahren getrennt und in reiner Form gewonnen. Da die Edelmetallgehalte von Autoabgaskatalysatoren mit 0,03 bis 0,2 Prozent deutlich niedriger liegen als die von herkömmlichen Scheidegütern, mussten die Verfahren entsprechend angepasst und optimiert werden.

Wegen der notwendigen hohen Investitionen in Logistik und Technologie hängt die Wirtschaftlichkeit stark von den Weltmarktpreisen der Pt-Gruppenmetalle ab. Da aber mehr als 80 Prozent des in der westlichen Welt verfügbaren Platins aus einem Land (Südafrika) stammt, sprechen auch volkswirtschaftliche Gründe und die Versorgungsabhängigkeit für die Rückgewinnung der Edelmetalle aus gebrauchten Autoabgaskatalysatoren.

3.2.5 Elektronikschrott

Der vorwiegend aus bestückten Leiterplatten bestehende Elektronikschrott ist ein inniger Stoffverbund verschiedener metallischer, anorganisch nichtmetallischer und organischer Materialien. Unter anderem sind Eisen- und Nichteisenmetalle, Kunststoffe, Glasfasern und keramische Bauteile enthalten. Verwendet werden aber auch toxische Materialien, wie z. B. bromhaltige Flammschutzmittel oder polychlorierte Biphenyle. Zu einer erfolgreichen Wiederverwertung gehört also nicht nur die Separierung der enthaltenen Materialien, sondern auch die Lösung der Schadstoffproblematik.

Aus einem gemeinsamen Forschungsprojekt heraus gründeten die damalige Daimler-Benz AG und die Bay-Gruppe aus Waiblingen bei Stuttgart das Joint-Venture-Unternehmen Bay-Tec, das nach dem Ausbau einer Pilotanlage in Ulm den Betrieb aufnahm [31]. Seit 1999 wird die neue Technik zur Verwertung von Leiterplatten weltweit vertrieben. Die bisherigen Verfahren erschienen den Entwicklern ökologisch und ökonomisch nicht zufriedenstellend. Hauptkritikpunkte waren die oft nicht ausreichende Ausbeute der in Elektronikschrott enthaltenen Edelmetalle und die mögliche Bildung von Dioxinen und Furanen bei thermischen aber auch mechanischen Verfahren. Im ersten Schritt des Bay-Tec-Verfahrens werden die Platinen in einer Vorzerkleinerungs-Anlage mittels scharfer Schneidwellen in ca. 4 cm² große Stücke zerteilt. Ein Magnet trennt eisenhaltige Materialien ab. Zur Rückgewinnung der Wertstoffe werden die Platinenstücke mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Die Kunststoffe werden unterhalb von -70 °C spröde. Wegen der unterschiedlichen Ausdehnung von Kunststoff und Metall entstehen Spannungen. Diese Spannungen sind so groß, dass die Materialien sich bei Beanspruchung leicht voneinander trennen. Dazu werden die Bruchstücke in einer Hammermühle zu kleinsten Teilchen vermahlen. Flüssiger Stickstoff wird während des ganzen Mahlprozesses zugeführt, so dass die Mahltemperatur niedrig bleibt. Da der Stickstoff zusätzlich den Sauerstoff der Luft verdrängt, können die Kunststoffe nicht oxidieren oder verbrennen. Damit ist die Entstehung von Dioxinen und Furanen ausgeschlossen. Nach Aufteilung in Fraktionen unterschiedlicher Korngröße durch Siebmaschinen, fallen die Partikel auf eine rotierende Metallwalze und werden in einem Hochspannungsfeld von 30000 V aufgeladen. Die Metalle geben ihre Ladung an die geerdete Walze ab und fallen in einen Sammelbehälter. Die elektrostatisch

aufgeladenen Kunststoffteilchen bleiben an der Walze haften und werden in einen anderen Behälter abgestreift. Das Verfahren kann auch feinste Reststoff-Stäube trennen. Andere Verfahren sind bei Korngrößen < 1 mm nicht mehr anwendbar, während das Bay-Tec-Verfahren noch Teilchen mit Korngrößen von < 0,1 mm trennt und damit die Edelmetallausbeute erhöht.

Die Norddeutsche Affinerie in Hamburg setzt Platinschrott (entstückte Leiterplatten) direkt in der Kupferverhüttung ein [32]. Dabei erfolgen die thermische Umsetzung der organischen Bestandteile und die Abtrennung von Metallen in einem Schritt. Im Konverterprozess der Kupferverhüttung wird bei hohen Temperaturen unter Eindüsen von Luft ein Rohkupfer erschmolzen. In die mehr als 1200 °C heiße Schmelze des Converters wird der Elektronikschrott eingebracht. Die hohe Temperatur und der Sauerstoffüberschuss führen zu einer vollständigen Verbrennung bzw. Zersetzung des Kunststoffes und anderer organischer Verbindungen, die Metalle lösen sich im flüssigen Kupfer und werden metallurgisch wiedergewonnen. Die Jahreskapazität liegt bei bis zu 12 t Gold und bis zu 9000 t Silber.

Die zunehmende Verringerung des Edelmetallgehaltes der Leiterplatten verschlechtert die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Nur die Edelmetalle werden wiederverwendet, organische Bestandteile werden zersetzt, unedle Metalle gelangen in die Schlacke.

Von der Eilenburger Elektrolyse- und Umwelttechnik GmbH wurde ein Verfahren vorgestellt, das Peroxodisulfat sowohl zur Metallauflösung als auch zum oxidativen Schadstoffabbau benutzt [33]. Eine von vielen möglichen Anwendungen ist die Aufarbeitung von Elektronikschrott. Peroxodisulfat wird in einer Elektrolysestufe bei gleichzeitiger Rückgewinnung der Metalle recycelt, wodurch eine Kreislauf-führung ohne Anfall von Abwasser bzw. Abprodukten möglich ist. Zur Depolymerisation und Hydrierung dient eine Kohleöl-Anlage (seit 1993 werden auch, seit 1995 ausschließlich Kunststoffabfälle des Dualen Systems Deutschland (DSD) verwertet). Die Reaktivität von Elektrik-Elektrotechnik (E&E) Kunststoffabfällen (z. B. Kabel) zusammen mit DSD-Kunststoffen im Verhältnis von 1:5 ist größer als die von reinem DSD-Material, wahrscheinlich durch Polycarbonate sowie durch die katalytische Wirkung der Metalle bedingt. Rückstand von reinem E&E-Material ist zu viskos und neigt zur Verkokung. Eine thermische Vorbehandlung führt

Tabelle 6
Verfahren zur Verwertung von Leiterplattenschrott [34]

derzeit übliche Beseitigungsverfahren	kommerziell Verwertungsverfahren	nicht kommerziell realisierte Verwertungsverfahren
Hausmülldeponie	Bay-Tec (mechanische Aufbereitung)	Pyrocom-Verfahren der BC-Consult (Pyrolyse, z. T. realisiert)
Hausmüllverbrennung	Norddeutsche Affinerie (Kupferhütte)	Kryo-Verfahren (mechanische Aufbereitung)
	Degussa (Edelmetallscheideanstalt)	EUT Elektrolyse (Peroxodisulfat-Elektrolyse)
	Verfahren der Recycling Nord (mechanische Aufbereitung)	
	Result-Verfahren (mechanische Aufbereitung)	

zu einer Entfrachtung der Feststoffe von Schadstoffen und ermöglicht eine rohstoffliche Rückgewinnung eines Teils der organischen Matrix. Die Materialverbunde werden in einem Drehrohrreaktor unter Ausschluss von Luftsauerstoff erhitzt. Produkte sind Spaltgas und Koks. In der Pyrolysetrommel wird das zerkleinerte Aufgabegut indirekt erhitzt. Flüchtige Schwermetallverbindungen werden in die Gasphase überführt. Kunststoffe verspröden und bilden eine brüchige Kohlenstoffmatrix, den Koks. Halogenorganische Verbindungen (PCB, Flammenhemmer) werden weitgehend zersetzt. Die Gasphase wird nach Verlassen der Trommel schlagartig abgekühlt, um eine Neubildung von Schadstoffen zu verhindern. Die *Tabelle 6* enthält eine zusammenfassende Übersicht über Verfahren zur Verwertung von Leiterplattenschrott.

Problematisch ist für alle Unternehmen, die sich mit der Wiederverwendung elektronischer Bauteile beschäftigen, das Fehlen von verlässlichen gesetzlichen Regelungen. Zum Stand der sogenannten IT-Altgeräte-Verordnung siehe auch Abschnitt 5.1.

3.2.6 Verbundmaterialien

Bei Verbundverpackungen handelt es sich meist nicht um Schichtsysteme im engeren Sinn, sondern um Lamine. Die Verpackungsverordnung [35] definiert Verbundverpackungen als aus mindestens zwei, von Hand nicht trennbaren Materialien bestehend, von denen keines einen Masseanteil von 95 Prozent überschreitet (§3 Abs. 4 VerpackV).

In der Regel sind zwei oder mehr dünne Folien fest miteinander verbunden. Es kann sich um voneinander verschiedene Materialien, aber auch um einander sehr ähnliche handeln. So sind z. B. Kunststofffolien zur Lebensmittelverpackung meist aus drei oder mehr verschiedenen Kunststoffen aufgebaut.

Getränkkartons bestehen aus Papier, Polyethylen und Aluminium. Die Papierschicht ist meist bedruckt. Eine direkte Wiederverwendung der Verbunde ist nicht, eine Weiterverwendung ohne Trennung des Verbundes nur begrenzt möglich, sie müssen daher in die Bestandteile aufgetrennt werden. Etwa 50.000 t/a, entsprechend einem Viertel der in Deutschland anfallenden Menge, werden mit dem Fibreflow-Verfahren [36] aufgearbeitet. Aus den Sammlungen des Dualen Systems kommen die Getränkekartons zu Kartonballen von 600 kg gepresst, werden in handtellergröße Stücke zerkleinert und in der Fibreflow-Trommel werden unter Zugabe von kaltem Wasser die Papierfasern durch Quellen, Reiben und Prall von den Folien getrennt. Der Papierfaserbrei wird durch Löcher in der Trommel abgesiebt, dann eingedickt und zur Papierherstellung geleitet, wo er als Rohstoff zur Herstellung von Wellpappenroh papier u. a. dient. Das PE/Aluminiumgemisch gelangt als Ersatzbrennstoff in ein Zementwerk. Eine weitere Aufarbeitung, um das Aluminium zurückzugewinnen, ist ebenfalls möglich.

Eine weiterentwickelte Variante dieser Technik ist das Kaktus-Verfahren (Kommunale Aachener Kunststoffaufbereitungs-Technologie zur umweltfreundlichen Sekundärrohstoffverwertung), das in einer Pilotanlage in Eschweiler bei Aachen seit November 1996 betrieben wird. Das Verfahren soll erstmals großtechnisch in einer für die Weltausstellung Expo in Hannover geplanten Anlage angewendet werden. Neu ist bei diesem Verfahren die automatische Sortierung,

die die bisher überwiegend manuelle Vorgehensweise ersetzen soll. Statt einer Mischkunststofffraktion fällt eine sortenreine Polyolefinfraktion an, die direkt weiterverarbeitet werden kann [37].

Die Säcke aus den Sammlungen des Dualen Systems (gelbe Tonne bzw. gelber Sack) werden maschinell geöffnet, ein Überbandmagnet zieht die magnetischen Weißblechverpackungen (Konserven- und Getränkedosen, Kronkorken, Gläserdeckel, ...) heraus. Der gesamte übrige Strom fällt in ein mit Wasser gefülltes Becken, in dem alle Inhaltsstoffe gereinigt werden. Verbundmaterialien wie Getränkekartons lösen sich in Papierfasern, Kunststoffe und Kunststoff-/Aluminiumverbunde auf. Kunststoffe und Aluminium gelangen in eine weitere Stufe, Papierfasern werden durch Pressen entwässert und zur Verwertung in einer Papierfabrik abgegeben. Kunststoffe und Aluminium werden dann geshreddert und in einer Sortierzentrifuge nach ihrer Dichte voneinander getrennt. Zuerst fällt Aluminium aus, gefolgt von spezifisch schweren Kunststoffen wie PET, PVC oder PS, und den leichten Polyolefinen PE und PP. Als zu deponierender Rest bleiben etwa vier Prozent der aufgegebenen Menge in Form eines stichfesten Schlammes zurück. Bei herkömmlichen Sortieranlagen beträgt dieser Rest 20 bis 30 Prozent.

Aluminium-haltige Verpackungsmittel werden in sehr großem Umfang für Lebensmittel eingesetzt. Meist ist es sehr dünn ausgewalzt und mit Kunststoffen, Papier und Lacken verbunden. Beim Einschmelzen von Aluminiumabfällen stören die organischen Anhaftungen, da sie sich bei der Erwärmung lange vor dem Aufschmelzen des Aluminiums zersetzen. Geschieht dies im Schmelzofen, entstehen Schadstoffe, die zurückgehalten werden müssen [38]. Daher werden solche Aluminium-Verbundfolien meist in einem vorgelagerten Schritt in einer separaten Pyrolysestufe thermisch gereinigt. Diese Vorbehandlung verursacht erhebliche Kosten, die den Erlös für das Sekundäraluminium schmälern. Daher wird dann nur solcher Schrott angenommen, aus denen das Aluminium zu vertretbaren Kosten zurückgewonnen werden kann. Der Rest wird weiterhin deponiert.

Eine neue Verfahrensvariante [43] arbeitet mit reiner Sauerstoffverbrennung und mit hohem Sauerstoffüberschuss. Zur Regelung der Anlage wird im Abgas mit Sensoren der Gehalt an unverbrannten Kohlenwasserstoffen gemessen und der Sauerstoffüberschuss entsprechend nachgeregelt. Da der Brenner in solchen Aluminium-Schmelzöfen nicht mehr gegenüber, sondern auf der gleichen Seite wie die Abgasöffnung angeordnet ist, muss das gesamte Abgas im Gegenstrom durch die heiße Flamme. Da diese hoch mit Sauerstoff angereichert ist, werden die Schadstoffe praktisch vollständig verbrannt. Der beträchtliche Brennwert der organischen Verunreinigungen hilft außerdem noch, Brennstoff zu sparen. Der Energiebedarf und auch die zu entsorgende Menge an Filterstaub sind nach Angaben des Herstellers um ein Drittel kleiner als bei herkömmlichen Verfahren. Durch die Verringerung der Abgasmenge (kein Stickstoff) steigt zudem der Wirkungsgrad, da weniger Wärme mit der Abluft verloren geht.

Ein trocken-mechanisches Trennverfahren [39] führt zu Aluminium-Schwergut und Aluminium-Leichtgut. Nach einer aufwendigen Vorbereitung mit den Schritten

- Leseband, (Nicht-Verpackungen wie Bratpfannen und Auto-Kühler, ... werden aussortiert),
- Vorzerkleinerung,
- mehrere Trennstufen, u. a. Magnetabscheider zur Entfernung ferromagnetischer Bestandteile und Windsichter, mit denen die Leichtfraktion mit hohem Kunststoffgehalt abgetrennt wird.

Die Leichtfraktion, die einen Aluminiumgehalt von 30 bis 35 Prozent besitzt, geht zur Pyrolyse. Das verbleibende Aluminium-Schwergut wird dann in einem sogenannten Beschleuniger „geknackt“. Gleichzeitig wird das Aluminium granuliert. Das Aluminiumgranulat wird nach verschiedenen Körnungen klassiert. Das Endprodukt hat einen Aluminiumgehalt von über 90 Prozent und kann der Sekundäraluminiumbranche als hochwertiges Ausgangsmaterial mit definierten Eigenschaften und garantierter Qualität angeboten werden.

Das Leichtgut wird bei ca. 450 °C unter Luftabschluss verschmolzen, die organischen Bestandteile entweichen größtenteils gasförmig. Nach weiterer mechanischer Aufbereitung entsteht Aluminium-Foliengries, ein feinkörniger Rohstoff z. B. für die Gießerei-Zulieferindustrie oder für die Herstellung von Vorlegierungen für Stahlerzeuger.

Verbundfolien für Verpackungszwecke bestehen meist aus einem 5-Schichten-Aufbau aus drei verschiedenen Materialien [40]. Außen befinden sich die Trägerschichten, in der Mitte eine Sperrschicht und dazwischen Haftvermittler, da eine Verbindung zwischen Sperrschicht und Trägerschichten meist nicht problemlos möglich ist. Sind die verwendeten Werkstoffe der Verbundfolien miteinander verträglich, ist eine erneute Verwendung in der Neuproduktion möglich. Handelt es sich jedoch um unverträgliche Werkstoffpaarungen, wie z. B. Polyethylen (PE) und Polyethylenterephthalat (PET) oder Polyamid (PA) und PE, bereitet eine Wiederverwendung Probleme. PA/PE wird zum Verpacken von Fleisch oder auch Teigwaren eingesetzt. PA liefert die Festigkeit und die Sperrwirkung gegen Sauerstoff, PE die Siegfähigkeit bei niedrigen Temperaturen und die Feuchtigkeitsbarriere. 1995 wurden in Westeuropa 100 000 t verbraucht. Bei PET/PE-Verbundfolien liefert das hochschmelzende PET die Festigkeit, das niedrighschmelzende PE die Flexibilität und niedrige Siegeltemperaturen. PE reduziert zudem die Kosten. Eingesetzt werden diese Folien für Verpackungen für Kaffee, Kekse oder Waschmittel. In Westeuropa werden 50 000 t bis 80 000 t pro Jahr verbraucht. Werden sie gemeinsam zu einem Blend verarbeitet, resultieren schlechte mechanische Eigenschaften, da z. B. PA dann nur sehr grob in einer kontinuierlichen PE-Matrix verteilt ist. Die Haftung zwischen PA-Partikeln und der PE-Matrix ist schlecht. Die Zugabe von sogenannten Verträglichkeitsvermittlern [45] verbessert die Dispersion des PA und somit die mechanischen Eigenschaften. Versuche, den für den Folienaufbau notwendigen Haftvermittler gleichzeitig als Verträglichkeitsvermittler einzusetzen, scheiterten bisher, da Haftvermittler auf optimale Haftung und Fließfähigkeit ausgelegt sind und nicht auf Verträglichkeitsvermittlung. Haftvermittler erhöhen zwar die Verträglichkeit, jedoch lassen sich keine Produkte mit akzeptablen Eigenschaften aus solchen Rezyklaten gewinnen. Der Zusatz von Verträglichkeitsvermittlern kann jedoch auch zusätzlich die Eigenschaften der Verbundfolien verbessern. Zur Wiederverwendung von Verbundfolien gibt es zwei Strategie-

en. Als Werkstoff für Nicht-Verpackungsanwendungen oder als Zuschlagstoff für neue Verbundfolien.

Von **Verbundmaterialien** werden beim Automobilhersteller BMW unter anderem die abgetrennten Ränder und ausgeschnittenen Durchbruchsegmente aus der Produktion von Innenausstattungsteilen, wie z. B. Instrumententafeln, wiederverwertet. Diese Teile sind in der Regel als Verbund aus Haut, Schaumstoff und Träger konzipiert. Seit 1996 werden bei einer Partnerfirma, der Wipag Polymertechnik in Neuburg/Donau, die für die Stanzabfälle ein Recyclingkonzept erarbeitet hat, jährlich ca. 100 t reines PP-Mahlgut aus Verbundabfällen zurückgewonnen [41].

3.3 Produktspezifische Beispiele

3.3.1 CDs

Alleine 1998 sind in Deutschland schätzungsweise 30 000 t bis 40 000 t an CD-ROMs verkauft worden⁸. Hinzu kommt noch eine wesentlich größere Anzahl an Audio-CDs. Eine einzelne CD wiegt ca. 15 g und ist ein Verbund aus Polycarbonat (PC), Aluminium, Lack und Druckfarbe. Auf einer 1,2 mm dicken Polycarbonatscheibe ist eine etwa 100 nm starke Reflexionsschicht aus Aluminium und darauf eine 20 bis 60 µm starke Schutzlack-/Farbdruckschicht aufgebracht. Die Reflexionsschicht besteht bei wiederbeschreibbaren CDs (CD-R, CD-Rewritable) aus Gold und wird noch durch eine 100 nm bis 200 nm dicke Cyanin-Farbschicht ergänzt [43].

Polycarbonat hat einen relativ hohen Marktpreis von ca. 6 000 DM pro Tonne Neuware, so dass ein Recycling des Substratmaterials wirtschaftlich attraktiv ist. Der Aluminiumgehalt ist dagegen gering, etwa 100 kg Aluminium sind pro 1000 t CDs mit einem Marktwert von ca. 200 DM enthalten, so dass eine Rückgewinnung nicht lukrativ ist [44].

Die Bayer AG trennt den Materialverbund mit einem chemischen Verfahren auf [43]. Von 1994 bis 1998 wurden ca. 5 000 t PC, das entspricht etwa 350 Millionen CDs, zurückgewonnen. 1998 wurde eine neue Anlage mit 5 000 t Jahreskapazität in Betrieb genommen. Die Bayer AG nimmt überwiegend Produktionsausschuss und unverkaufte Ware zurück. Aus den zerkleinerten CDs wird in mehreren Waschgängen mit heißer Natronlauge sortenreines Polycarbonat gewonnen. Jedoch wird die für eine Neuproduktion von CDs erforderliche optische Reinheit nicht erreicht. Abgemischt mit Neuware wird das qualitätsgesicherte Rezyklat z. B. in Computer- und Druckergehäusen, Schaltkästen und Lampenteilen eingesetzt.

Die Firma MAVEG/Wesero Maschinenbau GmbH in Sprockhövel entschichtet CDs mechanisch unter Verwendung eines Hochdruckwasserstrahls [42]. Auch die am Rand befindliche Lackschicht wird durch eine zusätzliche stationäre Düse abgetrennt, so dass eine nahezu 100%-ige Reinigungswirkung erreicht werden kann.

Die Newcycle Kunststofftechnik GmbH in Großhelfendorf bei München bereitet die CDs in einem mechanischen Verfahren auf. Die Materialschichten werden mit rotierenden Messern von der Polycarbonatscheibe entfernt. Das zurückgewonnene PC wird als Granulat auf dem freien Markt verkauft und findet vor allem in der Automobilindustrie Verwendung. Newcycle recycelt jährlich etwa 1 000 t Polycarbonat oder 60 Millionen CDs.

Polygram, ein Musikunternehmen mit eigener CD-Produktion, hat einen hausinternen PC-Kreislauf eingerichtet. Produktionsausschuss und Fehlchargen werden erneut der CD-Herstellung zur Verfügung gestellt. Auch Polygram wendet ein mechanisches Verfahren an, das mit Hilfe von Messern die Materialschichten vom Polycarbonat abtrennt. Da die „Alt-CDs“ genau definierte einheitliche Materialeigenschaften haben (nur eigenes Material!) kann absolut sortenreines Rezyklat gewonnen werden, das den hohen Anforderungen an die optische Reinheit für die CD-Produktion entspricht. Die Tageskapazität beträgt bis zu 50 000 CDs, das sind 10 bis 15 Millionen pro Jahr oder 150 bis 220 t Polycarbonat.

3.3.2 Magnetbänder

Computer-, Video- und Audiobänder können zwar mehrfach benutzt werden, müssen jedoch besonders im Bereich der Datensicherung nach vorgegebenen Zeiten bzw. Zyklen oder beim Auftreten von Beschädigungen ausgetauscht werden. In großen Rechenzentren z. B. bei Banken und Versicherungen fallen jährlich große Mengen an, die bisher nach Entmagnetisierung und Zerkleinerung deponiert oder thermisch verwertet wurden. Problematisch ist zum einen die sichere Vernichtung der Daten, zum anderen die Gefahr des Auswaschens von Schwermetallen aus dem Beschichtungsmaterial in den Boden und ins Grundwasser bei der Deponierung bzw. Abgase und Bildung unerwünschter Stoffe bei der Verbrennung. Zudem können weder das Trägerband noch die aus den Oxiden von Co, Cr und Fe bestehende Beschichtung zurückgewonnen werden.

Die Fuchs-Umweltechnik AG (FUTAG) hat ein Verfahren entwickelt, mit dem die Beschichtung mechanisch abgetrennt werden kann [45]. Ausgenutzt wird dabei die unterschiedliche Längenausdehnung der Metalloxidbeschichtung und des PET-Trägermaterials unter Zugbelastung. Die Anlage bereitet die Magnetbänder mit schnell rotierenden Walzen, Heizvorrichtungen und Schabemessern auf. Als Ziel hat die Firma sich eine Aufarbeitungsmenge von 10 000 t pro Jahr gesetzt, das entspricht etwa zehn Prozent der im gesamten Bundesgebiet anfallenden Abfallmenge aus dem Daten- und Tonträgerbereich. Das erste Recyclingzentrum dieser Art hat im März 1998 in Bergheim seinen Betrieb aufgenommen. Das Unternehmen nimmt pro Tonne Magnetband einen Preis von 900 DM. Das wiedergewonnene PET-G-Trägerband kann mit 400 bis 500 DM/t z. B. an Kunststoffverwertungsbetriebe weiterverkauft werden, die Metalloxide dienen als Rohstoff für metallverarbeitende Unternehmen.

3.3.3 Röntgenfilme

Seit 1968 werden weltweit Planfolien mit Polyethylenterephthalat (PET) als Trägerschicht für medizinische und technische Röntgenfilme sowie für Reprofilme benutzt. In Deutschland fallen jährlich etwa 30 Millionen m² Film-Material als Abfall an. Zudem lagern viele Tonnen über Jahrzehnte angesammeltes Material in Kliniken und Arztpraxen. Röntgenfilme enthalten im Vergleich zu anderen photographischen Filmen mehr Silberbromid; eingebettet sind die photoaktiven Substanzen in Gelatine, die mit Emulgatoren, Stabilisatoren etc. versetzt ist.

Die Entsorgung geschieht bisher meist auf der Deponie oder in thermischen Verwertungsanlagen. Die Kunststoffe wer-

den dabei zerstört. Bei herkömmlichen Verfahren der Verwertung von Filmmaterial stand die Gewinnung des in der photoaktiven Schicht enthaltenen Silbers im Vordergrund. Der Materialwert des PET übersteigt jedoch den des Silbers. Die Re-FILM Recycling GmbH in Westerborg entfernt die Beschichtung mit einem biologischen Verfahren [46]. Nach dem Entschichten lässt sich die dünne (0,17 mm), hellblaue PET-Folie in Overhead-Projektoren benutzen. Aufgrund ihrer Hitzebeständigkeit kann sie auch problemlos in Kopierern oder Laserdruckern eingesetzt werden. Ebenso kann man das PET auch zu neuen Produkten, wie z. B. Getränkeflaschen, verarbeiten.

Die Re-FILM Recycling GmbH erhielt für ihr Verfahren 1996 den Umweltpreis der Deutschen Industrie.

4 Diskussion

4.1 Zusammenfassung des status quo

Zur Zeit sind die Kosten für eine Deponierung von Abfall mit bis herab zu 30,- DM/t [47] so niedrig, dass Verwertungsverfahren in der Regel nicht wirtschaftlich sind. Ohne gesetzliche Vorgaben, wie z. B. die Verwertungsquoten der Verpackungsverordnung, werden neue Verwertungsverfahren nur selten eingeführt. Üblich sind dagegen Verwertungen am Ort der Entstehung, d. h. Produktionsabfall und/oder -ausschuss wird vom Hersteller wieder, soweit möglich, in der Produktion eingesetzt. Besonders wertvolle Schichten (Edelmetalle auf Leiterplatten) oder Substratmaterialien (PC für CDs) ermöglichen auch heute schon eine wirtschaftliche Verwertung.

Während der erneute Einsatz von unbeschichteten Materialien in der Produktion meist ohne weiteres möglich ist, ist der Wiedereinsatz von beschichteten Materialien oft nur mit Qualitätseinbußen möglich. Für den Hersteller ergibt sich damit die Notwendigkeit von weitreichenden Qualitätskontrollen.

Handelt es sich nicht um typen- bzw. sortenreinen Produktionsabfall oder -ausschuss, sondern um Abfall, wird der weitaus größte Teil in sogenannten Universalverfahren (siehe Abschnitt 3.1 „3.1 Großtechnische Verfahren“) aufbereitet, d. h. es wird eine Vielzahl ähnlicher Materialien gemeinsam nach Zerkleinerung auf eine prozessgängige Größe aufbereitet, wobei Beschichtungen mit Volumenanteilen im Promillebereich und darunter nicht gesondert behandelt werden. Je nach Verfahren resultiert eine mehr oder minder gute Trennung in verschiedene Werkstoffklassen, die einer weiteren Verwendung zugeführt werden. Die Qualität solcher Sekundärrohstoffe kann jedoch i. a. nicht mit der Qualität von Rezyklaten aus Produktionsabfall verglichen werden. So wird z. B. aus dem bedruckten Papier der Getränkekartonverpackungen Wellpappenrohmaterial hergestellt. Eine weitere „Reinigung“ dieser Rezyklate ist technisch und wirtschaftlich meist nicht sinnvoll.

Immer häufiger werden jedoch Anwendungen entwickelt, in denen nicht-sortenreine Rezyklate eingesetzt werden. So wird z. B. in der Automobilindustrie aufgearbeiteter Kunststoffabfall für Anwendungen in nicht sichtbaren Bereichen

des Fahrzeugs, z. B. Warmluftkanäle o. ä., eingesetzt [48]. Voraussetzung ist, dass die mechanischen Eigenschaften des Rezyklats für die gewünschte Anwendung ausreichend sind. Durch diese Art von Rezyklaten kann in vielen Fällen der Einsatz von für den Anwendungsfall zu hochwertigen Materialien vermindert werden und somit ein Beitrag zur Ressourceneinsparung (und Kostensenkung durch Einsatz preiswerterer Materialien) erbracht werden. Ein weiteres Beispiel für den Einsatz nicht sortenreiner Rezyklate ist die Herstellung von Gebrauchsgütern (Parkbänke, Blumenkübel, Möbel, ...). Die Rücknahmeverpflichtung des KrW-/Abf-Gesetzes ist für Batterien [49] und für Transportverpackungen [35] bereits durch Verordnungen geregelt. Für Altfahrzeuge existiert neben der Altfahrzeugverordnung [29] eine Freiwillige Selbstverpflichtung der Industrie, die, wenn sie für weitere Produktgruppen umgesetzt wird, einiges in Bewegung bringen kann. So hat die Firma IBM im Jahre 1999 den weltweit ersten Personal Computer auf den Markt gebracht, dessen Kunststoffteile vollständig aus recyceltem Material bestehen.

Für den Wiedereinsatz von Rezyklaten müssen also einige Voraussetzungen erfüllt sein. Neben der Verfügbarkeit ausreichend reiner Abfälle ist das Preis-Leistungs-Verhältnis im Vergleich zu Neuware von entscheidender Bedeutung. Folgende Faktoren müssen bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Beispiel von Kunststoffabfällen berücksichtigt werden:

- die Aufwendungen für das Sammeln und Lagern sortenreiner Kunststoffabfälle
- die Reinheit des Rezyklats
- die Kosten für die Aufbereitung zum spezifizierten Rezyklat
- die Lagerkosten der Kunststoffabfälle und des Rezyklats
- die Aufwendungen für den innerbetrieblichen Transport der Bauteile und des Rezyklats sowie
- die Kosten für die Qualitätskontrolle (z. B. für Freigabeprüfungen, Bauteilbemusterungen usw.).

Problem beim sogenannten „Downcycling“ ist u. a., dass eine solche Wiederverwertung nicht allzu oft wiederholbar ist, da die Qualität des Werkstoffes von Zyklus zu Zyklus schlechter wird. Von daher ist im Sinne einer nachhaltigen Wirtschaft dem echten werkstofflichen Recycling der Vorzug zu geben, obwohl gerade dieses durch Beschichtungen erschwert wird.

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz von 1996 hat auch schon in den Jahren vor seiner Verabschiedung viele Überlegungen und Initiativen zur Wiederverwertung von Abfällen initiiert. Vor allem die Einführung der Produktverantwortung über die Gebrauchsdauer hinaus war Anlass für Forschungen zur Verwertung beziehungsweise zum verwertungsgerechten Design. Die neue Definition der Produktverantwortung im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz verpflichtet Hersteller, Verarbeiter und Vertreiber dazu, ihre Produkte so zu gestalten, dass bei deren Herstellung und Gebrauch die entstehenden Abfälle minimiert und umweltverträglich verwertet und beseitigt werden können. Zuvor verstand man unter Produktverantwortung lediglich, dass Hersteller und Vertreiber die Verantwortung bezüglich Sicherheit und Funktionstüchtigkeit ihrer Produkte zu tragen haben.

Alle Arten von Verbundwerkstoffen bereiten natürlich besondere Probleme. Verbundstoffe bestehen nach der Begriffsbestimmung der Verpackungsverordnung [50] aus mindestens zwei von Hand nicht trennbaren Materialien, von denen keines einen Masseanteil von 95 Prozent überschreitet. Beschichtete Bauteile sind danach zwar keine Verbundstoffe, doch werden die meisten beschichteten Materialien zusammen mit Verbundstoffen aufgearbeitet.

Neben der noch nicht gegebenen Wirtschaftlichkeit (nicht ausreichende Mengen, zu hohe Sortierkosten, nicht erprobte Technologien) existieren auch Defizite bei der Normung der Verwendung von Rezyklaten. So schließen zum Beispiel drei Viertel von 171 betrachteten technischen Normen (DIN, EN und VDE) aus dem Kunststoffbereich die Nutzung von Sekundärkunststoff aus [51]. Derzeit gelten zum Beispiel für Kunststoffrohre für drucklose Anwendungen die gleichen Anforderungen wie für Hochdruckleitungen. Viele Normen stammen aus Zeiten, als an Rezyklate noch gar nicht zu denken war. Besser wäre es, statt bestimmter Materialien Qualitätsanforderungen festzulegen, um Rezyklate auch in dieser Hinsicht marktfähig zu machen.

Nur in wenigen Fällen werden Schicht/Substrat-Systeme als solche wiederverwertet. Meist wird nur das Substrat (z. B. beim Recycling von Compact Discs) wiederverwertet, seltener die Beschichtung (z. B. beim Recycling von Leiterplatten). In einigen Fällen wird die Beschichtung entfernt, um das Substrat für die Wiederbeschichtung vorzubereiten. Beispiele sind das Entschichten von Werkzeugen zwecks Neubeschichtung oder auch das Entlacken von Flugzeugen und Eisenbahnwaggons zur Inspektion und leichteren/besseren Neulackierung.

Die Entwicklung und Einführung von Verwertungsverfahren für Schicht/Substrat-Systeme ist oft wegen nicht ausreichender Mengen, zu geringen Erlösen und zu großem logistischen Aufwand unwirtschaftlich. Da wirtschaftliche Verwertungsverfahren nur mit großen Mengenströmen realisierbar sind, sind weitere Spezialverfahren für Schicht/Substrat-Systeme nur in Ausnahmefällen bei besonders wertvollen oder bei Materialien mit besonderem Gefährdungspotential zu erwarten.

Investitionen in Spezialverfahren lohnen sich überdies nur dann, wenn die beschichteten Bauteile über einen genügend langen Zeitraum anfallen werden. So ist zum Beispiel für Autoglas zu erwarten, dass es mittelfristig zumindest teilweise durch Polycarbonat ersetzt wird, wie es für Scheinwerferabdeckungen bereits realisiert ist. Das heißt, Verwertungsverfahren für beschichtetes Polycarbonat könnten wirtschaftlich sein (Beispiel CDs), für Autoglas vermutlich nicht mehr.

Die Ergebnisse der Studie werden in den folgenden Thesen wie folgt zusammengefasst:

- Produktrecycling beschichteter Bauteile existiert nur in wenigen Fällen (z. B. PET-Folien aus Röntgenfilmen)
- Materialrecycling gibt es nur bei wertvollen Schicht- bzw. Substratmaterialien (z. B. Edelmetallschichten auf Leiterplatten, Polycarbonat-Substrate für CDs)
- in den meisten Fällen wird nur das Substratmaterial, seltener das Schichtmaterial wieder- oder weiterverwendet (Ausnahme: Magnetbänder)

- Eine Weiterverwendung oder eine Wiederverwertung beschichteter Bauteile wird durch ungünstige Materialkombination von Schicht und Substrat erschwert
- auch Rezyklate beschichteter Bauteile müssen qualitätsgesichert sein
- Produktdesign beschichteter Bauteile muss zukünftig recyclinggerechtes Design einschließen
- Normen und Richtlinien sollten die Verwendung von Rezyklaten zulassen und fördern.

4.2 Trends und Entwicklungen

Verwertungsverfahren müssen entweder wirtschaftlich oder gesetzlich vorgeschrieben sein. Für eine richtige Betrachtung der ökonomischen und ökologischen Folgekosten sind jedoch nicht nur die reinen Deponierungskosten, sondern auch alle weiteren Umweltkosten zu berücksichtigen. Techniken, solche Kosten zu bestimmen, sind in der Entwicklung, werden jedoch praktisch bisher kaum angewandt. Erst wenn alle Kosten in den Preis eines Produkts/einer Dienstleistung eingehen, ist zu erwarten, dass Ökonomie und Ökologie sich a priori nicht mehr ausschließen. Am Lehrstuhl für Polymertechnik der Technischen Universität Berlin ist die „Vergleichende Normierende Bewertung (VENOB)“ als Methode zur Umweltbilanzierung von Recyclingverfahren entwickelt worden [52]. Eine solche Ökoeffizienzanalyse gliedert sich in drei Phasen:

1. **Ökonomische Aspekte**
Gesamtkostenrechnung, Schwachstellen, Kostensenkungspotentiale
2. **Umweltbelastung**
Energieverbrauch, Verbrauch natürlicher Ressourcen, Emissionen, Toxizitätspotential, Missbrauchs- und Risikopotential; Zahlenwerte werden mit Wirkungsfaktoren zur „Wirksamkeit“ (ähnlich „Lifecycle analysis“) zusammengefasst.
3. **Gewichtung der Umweltbelastungen**
qualitativ (Bedeutung, die die Gesellschaft der jeweiligen Belastung beimisst; quantitativ (statistische Daten, welchen Anteil die betrachtete Emission an der Gesamtemission in Deutschland hat).

Eingesetzt wird die Ökoeffizienz-Analyse zum Beispiel bei der BASF AG, die seit 1996 bereits 70 ihrer Produkte und Herstellungsverfahren danach untersucht hat [53].

Für echte Kreislaufauflösungen ist die Minimierung bzw. Extraktion von Schadstoffen unbedingte Voraussetzung. Sonst dienen die Rezyklate als „Zwischenlager“ für die Schadstoffe vor der endgültigen Ablagerung auf der Deponie.

Ökologisch am effektivsten ist sicherlich eine Verlängerung der Nutzungsdauer technischer Geräte. Der höhere Anschaffungspreis würde für den Nutzer durch die längere Nutzungsdauer ausgeglichen werden. Ob sich dies zukünftig am Markt und bei den gegenwärtigen Konsumgewohnheiten durchsetzen lässt, erscheint fraglich.

Auch wenn das Thema dieser Studie das Recycling von beschichteten Bauteilen ist, darf nicht vergessen werden, dass bei vielen Produkten ein Großteil der Umweltbelastung und des Ressourcenverbrauchs schon in der Herstellung und nicht notwendigerweise im Endprodukt liegt. Nach einer Abschätzung der Firma IBM gehen bei der Herstellung

eines Personal Computers nur 1,4 Prozent der benötigten Stoffe in das Produkt mit ein [54]. Somit können bei einer vollständigen Verwertung ausgedienter Computer also maximal 1,4 Prozent der eingesetzten Stoffe wieder in den Kreislauf gebracht werden. Auch hier zeigt sich die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Ökobilanzierung.

Ziel muss es sein, Verbundsysteme und damit auch Beschichtungen so zu entwickeln, dass sie mit Universalverfahren problemlos, d. h. zusammen mit anderen Produkten, verwertet werden können. Besonders die kostenweil personalintensive Vorsortierung kann dadurch weitgehend reduziert werden. Alternativ sind verträgliche Werkstoffkombinationen anzustreben, d. h. Schicht- und Substratmaterial müssen so beschaffen sein, dass ein erneuter Einsatz in der Produktion keine Qualitätseinbußen durch das zuvor aufgebrachte, nun mit eingearbeitete, Schichtmaterial hervorruft. Denkbar ist, „Trennschichten“ analog zu einem Klettverschluss neben den meist notwendigen Haftvermittlern einzusetzen. Eine Kombination aus Trennschicht und Haftvermittler wäre natürlich ideal, ist aber wegen der gegensätzlichen Anforderungen wohl schwer zu realisieren. Lösungen wird es wohl nur für einzelne Schichtsysteme, jedoch nicht für Beschichtungen allgemein, geben.

Recyclinggerechtes Design, d. h. das Miteinbeziehen von Verwertungs- und Trennmöglichkeiten bereits bei der Produktentwicklung kann durch Verwertungsgebote bzw. -quoten gefördert werden. Darüber nachgedacht wird in vielen Bereichen [55]. Doch solange die Kostenfrage nicht geklärt ist, z. B. ob der Erstkäufer oder der letzte Besitzer zusätzliche Entsorgungs- bzw. Verwertungskosten übernimmt, wird kein Unternehmen größere Anstrengungen unternehmen, solche Gedanken in die Praxis umzusetzen. Fehlende gesetzliche Vorgaben (z. B. das Ausbleiben einer IT-Geräteverordnung) lassen Investitionen in solche Techniken als wenig sinnvoll erscheinen. Sollte Deutschland bis zum Sommer 1999 keine solche Verordnung auf den Weg bringen, steht zu erwarten, dass sich wegen des wahrscheinlich im Sommer anlaufenden diesbezüglichen EU-Gesetzgebungsverfahrens bis zum Jahre 2004 der gegenwärtige Status nicht ändert [61].

Recycling wird heute nicht durch die zur Verfügung stehende Technik begrenzt, sondern durch ökonomische (und ökologische) Randbedingungen. Hohe Reinheitsgrade können heute bei Stoffverbunden aller Art schon erreicht werden, doch sind solche Techniken derzeit zu teuer. Angewandte Lösungen sind daher relativ grob, aber preisgünstig. Die mögliche Einführung von Verwertungsquoten kann dies fördern, birgt jedoch auch die Gefahr, dass diese Quoten durch Beschränkung auf einfache Verfahren bzw. leicht zu verwertende Produkte keinen Anreiz bieten, komplexe und aus vielen Materialien bestehende Produkte einer Verwertung zuzuführen.

Dass kleine Änderungen am Produkt große Auswirkungen auf die Recyclingfähigkeit haben, zeigt sich wiederum an einem Beispiel aus dem Bereich des Elektronikschrotts. Ein Grund dafür, dass bisher nur ein Teil der Geräte recycelt wird, sind Etiketten auf den Kunststoff-Gehäusen. Neben dem Etikettenmaterial verunreinigen schon kleinste Mengen Klebstoff das Rezyklat so stark, dass es für eine neue Gehäuseproduktion nicht mehr in Frage kommt. In der Regel müssen die störenden Etiketten samt Klebstoff mühe-

voll in Handarbeit mit einem Schaber abgekratzt werden. Der Folienhersteller 3M hat zusammen mit Siemens-Nixdorf und Bayer Leverkusen ein neues Kennzeichnungsmaterial entwickelt, das zu den gängigen Basis-Kunststoffen kompatibel ist [56]. Die Folie 3M 8000 wie auch der verwendete Klebstoff können vollständig verwertet werden. Voraussetzung ist lediglich, dass die verwendeten Druckfarben das Rezyklat nicht beeinträchtigen. Gegenüber dem höheren Einkaufspreis stehen nur noch ein Zehntel der Kosten beim Recycling. Auch Ausschussware kann direkt wiederverwertet werden.

Alle Vorschriften und Verordnungen bringen jedoch keine Änderung der Situation, solange nur national gehandelt wird. Das Beispiel der Altautoverordnung zeigt, wie der Markt reagieren kann: Die zertifizierten Altautoverwertungsbetriebe sind trotz hoher Investitionen nicht ausgelastet, die geplante Annahmehöhe kann nicht realisiert werden, eine Viel-

zahl von nicht zertifizierten Firmen ist weiterhin am Markt. Die Zertifikate sind nicht objektiv, der Export von Altfahrzeugen besonders nach Osteuropa floriert und liegt zur Zeit nach Schätzungen des Verbandes der Automobil-Verwerter VAV bei ca. 50 Prozent [57]. Nach Angaben des Verkehrsclub Deutschland (VCD) [58] sind 1998 von den 2,7 Millionen jährlich zu entsorgenden Autos sogar nur 800.000 bei den Autoverwertern abgegeben worden.

4.3 Schlussbemerkung

Die Studie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Nennung von Firmennamen, Produkt- und Verfahrenszeichnungen besagt nicht, dass diese Firmen, Produkte oder Verfahren die einzigen oder in irgendeiner Weise ausgezeichneten oder zu empfehlenden Beispiele für die jeweilige Anwendung sind.

5 Anhang

5.1 Gesetze, Verordnungen, Richtlinien

Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) vom 27. September 1994, in Kraft getreten am 27. September 1996 (BGBl. I, S. 2705).

Neuregelung der Verpackungsverordnung: Bundesrat hat am 29. Mai 1998, Bundestag am 24. Juni 1998 zugestimmt. (BGBl. I 1998 S. 2379)

Europäische Verpackungsrichtlinie (Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle vom 20. Dezember 1994, 94/62/EG; Abl. L 365/10 v. 31.12.1994).

Verordnung über die Entsorgung von Geräten der Informations-, Büro- und Kommunikationstechnik (IT-Altgeräte-Verordnung) (Bundestagsdrucksache 13/10769 vom 22.05.98, Bundestagsdrucksache 13/11024 vom 17.06.98).

Der Bundestag hat am 18. Juni 1998 den Entwurf gebilligt.

Für andere Elektrogeräte (Braune Ware, Weiße Ware, etc.) existiert noch nicht einmal ein Entwurf.

Eine EU-Richtlinie zur Entsorgung von Elektronikschrott (umfasst alle Elektrogeräte) ist zur Zeit noch ein Referentenentwurf. Enthalten sind weitaus schärfere Anforderungen als in der geplanten deutschen Verordnung, insbesondere bei der Sammel- und Verwertungsqualität, im Anwendungsbereich und bei der Vermeidung bestimmter umweltbelastender und recyclingerschwerender Stoffe. Nationale Gesetzgebungsverfahren müssen dann ruhen, bis das Gesetzgebungsverfahren in der EU abgeschlossen ist! Sollte der Bundesrat bis dahin nicht zugestimmt haben, bleibt die Unsicherheit für Verwerter, Hersteller und Verbraucher weiterhin bestehen, bis das EU-Recht in voraussichtlich zwei oder drei Jahren, wenn nicht noch später, Geltung erlangt. Bis dieses Gemeinschaftsrecht dann in nationales Recht umgesetzt wird, können weitere Jahre vergehen.

Die **Chemikalien-Verbotsverordnung** (ChemVerbotsV) vom 14. Oktober 1993 (BGBl. I S. 1720), mit den Änderungen von 1996 (BGBl. Nr. I/1996 S. 1151 und BGBl. Nr. I/1996 S. 1498) schließt eine stoffliche Verwertung dann aus, wenn in ihr aufgeführte Schadstoffe in hoher Konzentration vorliegen. Ein Recycling würde ein Wieder-Inverkehrbringen der verbotenen Substanz bedeuten.

Verordnung über die Überlassung und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen – **Altfahrzeugverordnung** (AltfahrzV) vom 4. Juli 1997 (BGBl. I S. 1666).

Sie gilt seit dem 1. April 1998 zusammen mit der „Freiwilligen Selbstverpflichtung zur umweltgerechten Altfahrzeugverwertung (Pkw) im Rahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes“ (FSV). Der letzte Fahrzeughalter muss das Altfahrzeug einem zertifizierten Verwertungsbetrieb übergeben und erhält einen Verwertungsnachweis. Die Automobilindustrie verpflichtet sich, Fahrzeuge, die nach Inkrafttreten der FSV zugelassen worden und nicht älter als 12 Jahre sind, zurückzunehmen.

Europäische Altfahrzeugverordnung am 22. Juli 1999 vom Rat der Umweltminister angenommen, wird noch im Europäischen Parlament beraten. Rücknahmeverpflichtung der Hersteller ab 2006, bis zum Jahr 2006 sollen mindestens 85 Prozent eines Autos wiederverwertet werden können, bis zum Jahr 2015 95 Prozent. Da beim Recycling vor allem Schwermetalle Probleme bereiten, soll die Verwendung von bestimmten Stoffen dieser Art in Neufahrzeugen verboten werden.

Weitere Regelungen zu einzelnen Produktgruppen (aus dem Umweltbericht 1998):

Graphische Papiere: Selbstverpflichtung von Verbänden und Organisationen der papierherstellenden Industrie etc. vom Oktober 1994, die Verwertungsquote bis 2000 auf 60 Prozent zu erhöhen. (erreicht: 1994 64 Prozent, 1996 >80 Prozent).

Bauabfälle: Selbstverpflichtung der Arbeitsgemeinschaft „Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB)“ vom November 1996, bis 2005 die Menge der abgelagerten verwertbaren Abfälle zu halbieren.

Batterien: Batterie-Verordnung vom 27. März 1998 (BGBl. I S. 658)

5.2 Adressenverzeichnis

Die folgende Übersicht enthält Adressen der in der Studie namentlich erwähnten Firmen, Verbände, Vereinigungen etc. in alphabetischer Reihenfolge.

Informationen zu Möglichkeiten der Wiederverwendung, der Verwertung und der Entsorgung sind auch bei den Industrieverbänden, den Industrie- und Handelskammern und den Entsorgungsgemeinschaften erhältlich.

Firma: **Atotech Deutschland GmbH**

Straße: Postfach 21 07 80

PLZ/Ort: 10507 Berlin

Telefon: (030) 349 85-0

Telefax: (030) 349 85-777

Internet: <http://www.atotech.de>

E-Mail: MarketingService@atotech.de

Firma: **Bayer AG Leverkusen**

KU-EU/Recycling

Straße: Geb. B 207

PLZ/Ort: 51368 Leverkusen

Telefon: 0214-303637

Telefax: 0214-3031318

Internet: <http://www.plastics.bayer.de/>

E-Mail: MARTIN.SCHMID.MS@bayer-ag.de

Firma: **BayTEC Wertstoffrückgewinnung GmbH**

Straße: Schüttelgrabenring 3

PLZ/Ort: 71332 Waiblingen

Telefon: +49-7151-50024-0

Telefax: +49-7151-50024-19

Internet: <http://www.bay-gruppe.de/baytec>

E-Mail: Leo@Bay-Gruppe.de

Firma: **BC Berlin-Consult GmbH**

Straße: Am Karlsbad 11

PLZ/Ort: 10785 Berlin

Telefon: (030) 25467-242

Telefax: (030) 2652-373

Internet: <http://www.berlin-consult.de>

E-Mail: Schumann@berlin-consult.de

Firma: **Degussa-Hüls AG
Produktmanagement
Edelmetallscheidung und Chemie**

Straße: Rodenbacher Chaussee 4

PLZ/Ort: 63457 Hanau

Telefon: 06181-59-2178

Telefax: 06181-59-3385

Internet: <http://www.degussa.de>

E-Mail: chem.em@degussa-huels.de

Firma: **Duales System Deutschland AG**

Straße: Frankfurter Straße 720-726

PLZ/Ort: 51145 Köln

Telefon: 02203-937-0

Telefax: 02203-937-190

Internet: <http://www.gruener-punkt.de>

E-Mail: info@gruener-punkt.de

Firma: **EAR European Autocat Recycling GmbH**

Straße: Siemensstraße 20

PLZ/Ort: 63755 Alzenau

Telefon: +49 (0) 60 23 / 9 55-03

Telefax: +49 (0) 60 23 / 9 55-211

Firma: **Eilenburger Elektrolyse- und
Umwelttechnik GmbH**

Straße: Ziegelstraße 2

PLZ/Ort: 04838 Eilenburg

Telefon: +49 (0) 34 23 / 66 16 45

Telefax: +49 (0) 34 23 / 66 16 51

Firma: **E.R.N. Elektro-Recycling Nord GmbH**

Straße: Peutestraße 21-23

PLZ/Ort: 20539 Hamburg

Telefon: 040-78 04 78 - 0

Telefax: 040-78 04 78 - 78

Internet: <http://www.ern-gmbh.de>

E-Mail: info@ern-gmbh.de

Firma: **FKuR - Forschungsinstitut
Kunststoff und Recycling GmbH**

Straße: Siemensring 79

PLZ/Ort: 47877 Willich

Telefon: (02154)9251-0

Telefax: (02154)428823

Internet: <http://www.fkur.de>

E-Mail: info@fkur.de

Firma: **Fuchs Umwelttechnik AG**

Straße: Fürholzener Straße 1

PLZ/Ort: 85386 Eching

Telefon: (089) 379 073 0

Telefax: (089) 319 57 97

Internet: <http://>

Firma: **Maveg GmbH**

Straße:

PLZ/Ort: 45537 Sprockhövel

Telefon: (02324)9788-0

Telefax: (02324)978820

Firma: **Messer-Griesheim AG**
Unternehmensleitung Industriegase
Deutschland
Straße: Fütingsweg 34
PLZ/Ort: 47805 Krefeld
Telefon: (+49) 21 51 3 79-0
Telefax: (+49) 21 51 3 79-11 5
Internet: <http://www.gase.net>
E-Mail: industriegase@messer.de

Firma: **Newcycle Kunststofftechnik GmbH**
Straße: Dorfstr. 7
PLZ/Ort: 85655 Großhelfendorf
Telefon: 0 80 95/7 88
Telefax: 0 80 95/20 83

Firma: **Norddeutsche Affinerie**
Aktiengesellschaft
Straße: Hovestraße 50
PLZ/Ort: 20539 Hamburg
Telefon: +49 (0) 40 / 78 83-0
Telefax: +49 (0) 40 / 22 55
Internet: [http:// www.affinerie-hamburg.de](http://www.affinerie-hamburg.de)
E-Mail: tkehde@affinerie-hamburg.de

Firma: **Polygram Manufacturing &**
Distribution Centres GmbH
Straße: Emil-Berliner-Straße 13
PLZ/Ort: 30851 Langenhagen

Firma: **Result Technology AG**
Straße: Im Seefeld
PLZ/Ort: CH-8265 Mammern
Telefon: ++41 (0)52 742 03 03
Telefax: ++41 (0)52 742 03 00
Internet: <http://www.result-technology.com>
E-Mail: result@result-technology.com

Firma: **Trentec**
Werkstoffrückgewinnungsanlagen AG
Straße: Industriegebiet
PLZ/Ort: 99713 Rockensußra
Telefon: (03 60 20) 7 03-0

Firma: **WIPAG**
Straße: Nördliche Grünauer Str. 21
PLZ/Ort: 86633 Neuburg (Donau)
Telefon: ++49 - 8431 - 4336-0
Telefax: ++49 - 8431 - 4336-22
Internet: <http://www.wipag.de>
E-Mail: wipag@t-online.de

5.3 Literatur-Recherche

Datenbanken, die zur Literatur-Recherche genutzt wurden:

Die Datenbankrecherchen erfolgten über STN International, The Scientific & Technical Information Network. Dieses Netzwerk wird gemeinsam betrieben vom Fachinformationszentrum Karlsruhe, der American Chemical Society (ACS) und der Japan Science and Technology Corporation, Information Center for Science and Technology (JICST) betrieben.

COMPENDEX (COMPUterized ENgineering INDEX and EI Engineering Meetings database)

Hersteller: Engineering Information, Inc., U.S.A

ENERGY (Energy Science and Technology)

Hersteller: Internationale Zusammenarbeit im Rahmen der International Energy Agency/Energy Technology Data Exchange

JICST-EPIus

Hersteller: The Japan Science and Technology Corporation, Information Center of Science and Technology (JICST), JP

NTIS (National Technical Information Service)

Hersteller: National Technical Information Service (NTIS), U.S.A

SCISEARCH

Hersteller: Institute for Scientific Information, U.S.A

ULIDAT (Umwelt-Literatur-DATENbank)

Hersteller: Umweltbundesamt Berlin

Alle Datenbanken außer ULIDAT sind englischsprachig.

Eine typische Datenbanksuche sah z. B. folgendermaßen aus:

Suchbegriffe waren:

- a) remov?, recyc?,
- b) tape, disc?, CRT, TFT, car glass, laminated, enamel, galvani?, composite.

Das Fragezeichen am Ende eines Wortes steht für beliebige weitere Buchstaben. So umfasst der Suchbegriff „remov?“ sowohl removal wie auch remove und alle anderen Begriffe die mit „remov“ beginnen.

Zu a) gab es z. B. 582 619 Einträge in den Datenbanken, zu b) 3 234 608 Fundstellen.

Die Kombination ergab immer noch 98 124 Einträge, in denen die Suchbegriffe aus a) und b) in allen denkbaren Kombinationen vorkamen. Durch weitere Eingrenzung erhielt man eine auswertbare Anzahl von Fundstellen. So wurde zum Beispiel durch Ausschluss der Begriffe „superconduct?, galvani? und composit?“ die Zahl der Fundstellen auf 348 reduziert. Als problematisch erwiesen sich bei der Datenbanksuche mehrdeutige Begriffe. So kann das englische Wort „enamel“ sowohl für Email, Emailack, Emailfarbe usw. als auch für Zahnschmelz stehen. Die Suchkombination „remov?“ und „enamel“ zeigte dann auch alle Literaturstellen, in denen Zahnmediziner über die Entfernung des Zahnschmelzes berichten, an.

5.4 Literatur-Zitate

- [1] DIN 8580, Ausgabe 1974-06, Fertigungsverfahren; Einteilung
- [2] Kabinettsitzung der Bayerischen Landesregierung am 10. September 1996
- [3] Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) vom 27. September 1994, in Kraft getreten am 27. September 1996 (BGBl. I S. 2705).
- [4] Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen vom 27. August 1986 (BGBl. I S. 1410, 1501)
- [5] Möbius, A., Fuhrmann, A., Pies, P. mo metalloberfläche 51(1997) 9, S. 659-666
- [6] DIN 19537-2, Ausgabe 1988-01, Rohre und Formstücke aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) für Abwasserkanäle und -leitungen; Technische Lieferbedingungen
- [7] DIN V 19534-2, Ausgabe 1992-11 Rohre und Formstücke aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U), mit Steckmuffe für Abwasserkanäle und -leitungen; Technische Lieferbedingungen
- [8] Oberflächentechnik-Report Hamburg und Schleswig-Holstein der TUHH-Technologie GmbH (TuTech) 1997
- [9] Bledzki, A. K., Lieser, J.: 6. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium (NDVaK), Dresden 1998
- [10] Norm-Entwurf DIN 8592, Ausgabe 1985-06, Fertigungsverfahren Reinigen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [11] Bledzki, A. K., Lieser, J.: 6. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium (NDVaK), Dresden 1998
- [12] Beck, R.: WLB Wasser, Luft und Boden (1998) 11-12, S. 59-61
- [13] Hausmann, K.: Kunststoffe 85 (1995) 4, S. 446-451
- [14] Gerling, F.: Kunststoffe 84 (1994) 7, S. 899-903
- [15] Kunststoffe 84 (1994) 7, S. 905-906
- [16] Jungert, D., Calefice, J.: mo Metalloberfläche 52 (1998) 1, S. 46-47
- [17] Neuhoff, U., Schmiemann, A.: 6. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium (NDVaK), Dresden 1998
- [18] Schmiemann, A., Busse, J., Rettenmaier, S.: mo Metalloberfläche 50 (1996) 2, S. 121-124
- [19] Jungert, D., Calefice, J.: mo Metalloberfläche 52 (1998) 1, S. 46-47
- [20] Rauenschwender, W.: mo metalloberfläche 49 (1995) 5, S. 370-372
- [21] Löhr, K., Kettermann, B.-U., Zürn, J.: mo metalloberfläche 48 (1994) 7, S. 483-488
- [22] Rauenschwender, W.: mo metalloberfläche 49 (1995) 5, S. 370-372

- [23] Möbius, A., Fuhrmann, A., Pies, P.:
mo metalloberfläche 51 (1997) 9, S. 659- 666
Möbius, A., Fuhrmann, A., Pies, P.:
mo metalloberfläche 51 (1997) 10, S. 742-745
Möbius, A., Fuhrmann, A., Pies, P.:
mo Metalloberfläche 52 (1998) 1, S. 44-45
- [24] Faulstich, M.; Freudenberg, A.; Kley, G.; Köcher, P.:
Abfallwirtschaftsjournal 3 (1991) 6, S. 339-347
Kley, G., Köcher, A., Freudenberg, A. Faulstich, M.: Bei-
heft 31 zu „Müll und Abfall“ (1994) S. 146-149
- [25] Deike, R., Hillmann, C.:
Stahl und Eisen 119 (1999) 2, S. 53-58
- [26] Sekundär-Rohstoffe (1996) 3, S. 101-103
- [27] Sekundär-Rohstoffe (1997)11, S. 399-400
- [28] Hurrle, B.:
Müll und Abfall (1997) 9, S. 554-556
- [29] Verordnung über die Überlassung und umweltver-
trägliche Entsorgung von Altautos (Altauto-Verord-
nung – AltautoV) vom 4. Juli 1997 (BGBl. I S. 1666)
- [30] Brumby, A.:
Metall 42 (1988) 7, S. 711-713
- [31] Umwelt 29 (1999) 4, S. 19
- [32] Recycling Magazin (1998) 3, S. 20-21
- [33] Thiele, W., Matschiner, H.:
in: Fleischer, G.: EDV, Elektronikschrott, Abfallwirt-
schaft, Berlin (1993) S.193-203
- [34] Sekundär-Rohstoffe (1997) 2, S. 52-54
- [35] Neuregelung der Verordnung über die Vermeidung
von Verpackungsabfällen (Verpackungsverordnung –
VerpackV) (BGBl. I 1998 S. 2379)
- [36] Umwelt (VDI) 27 (1997) 4, S. 25-26
- [37] Umwelt (VDI) 28 (1998) S. 26-28
- [38] Vollrath, K.:
Recycling Magazin (1998) 7, S. 17-18
- [39] Vollrath, K.:
Recycling Magazin (1998) 9, S. 25
- [40] Hausmann, K.:
Kunststoffe 85 (1995) 4, S. 446-451
- [41] Korzonnek, J., Wiedemann, P.:
Kunststoffe 89 (1999) 3, S. 112-116
- [42] DKR im Blick (1998) 5, S. 11
- [43] Bledzki, A. K., Lieser, J.:
6. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium
(NDVaK), Dresden 1998
- [44] Hähnsen, H., Schmid, M., Orth, P., Tappe, P.:
Kunststoffe, 88 (1998) 2, S. 213-216
- [45] Sekundär-Rohstoff (1998) 2, S. 81-82
Entsorga (1998) 5, S. 102-103
- [46] Sekundär-Rohstoffe (1996) 7-8, S. 294
- [47] Hintergrunddossier der Koordinationsstelle Genehmi-
gungsverfahren des Öko-Instituts e.V., Freiburg vom
14.01.1998
- [48] Korzonnek, J., Wiedemann, P.:
Kunststoffe 89 (1999) 3, S. 112-116
- [49] Batterie-Verordnung vom 27. März 1998
(BGBl. I S. 658)
- [50] § 3 Abs. 4 der Verordnung über die Vermeidung und
Verwertung von Verpackungsabfällen (Verpackungs-
verordnung – VerpackV) vom 27. August 1998
(BGBl. I 1998 S. 2379 ff.)
- [51] DKR im Blick 9 (1998)
- [52] DKR im Blick 1 (1999)
- [53] Pressemitteilung der BASF AG vom 24.08.1999
- [54] c't Magazin für Computertechnik (1999) 8, S. 90-94
- [55] Fischer, Th., Landeck, H.:
Elektronik (1998) 13, S. 62-68
- [56] Süoss, B.:
Umwelt 29 (1999) 3, S. 12-13
- [57] Schmitz, H. J.:
WLB Wasser, Luft und Boden (1999) 5, S. 72-74
- [58] Presseerklärung des Verkehrsclub Deutschland
(VCD) vom 11.03.1999

