

# 1 Einleitung

Derzeit fahren auf Deutschlands Straßen bereits mehr als 40 Millionen Pkw [144]. Davon werden jährlich fast drei Millionen stillgelegt. Die weitere kontinuierliche Zunahme des Kraftfahrzeugbestandes in der Bundesrepublik Deutschland führt deshalb auch zu einem steigenden Aufwand für die Entsorgung von Altautomobilen. Um die damit verbundenen Aufgaben bewältigen zu können, haben am 21.01.1996 16 Branchen eine „Freiwillige Selbstverpflichtung zur Verbesserung der Altautoentsorgung“ abgegeben. Im Jahr 1997 wurde die „Verordnung über die Entsorgung von Altautos und die Anpassung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften“ (AltautoV) im Bundeskabinett verkündet und im Jahr 1998 im Bundestag verabschiedet [1, 2]. Diese schreibt ab dem Jahr 2015 eine Reduzierung der zu beseitigenden Abfallmenge in Altfahrzeugen auf 5 Ma-% vor. Maximal 10 Ma-% dürfen thermisch verwertet werden [3, 152].

Beim gegenwärtigen Recycling von Altautos besteht das Wertschöpfungspotential vor allem in der Veräußerung von Baugruppen und der Verarbeitung metallischer Komponenten in Hüttenprozessen. Metallische Komponenten sind zuvor durch den Recyclingbetrieb zu demontieren. Die weiterhin im Verlauf der Demontage anfallenden, beträchtlichen Kunststoffmengen können zur Zeit kaum sinnvoll verwertet werden.

Andererseits nimmt aber im Automobilbau gerade der Anteil dieser Materialien ständig zu. Ressourcenschonung und die Realisierung von Gewichts- und Funktionsvorteilen fördern ein solches Wachstum. Die nachfolgende Abbildung zeigt den bisherigen und den zu erwartenden massenspezifischen Kunststoffanteil in Pkw's.

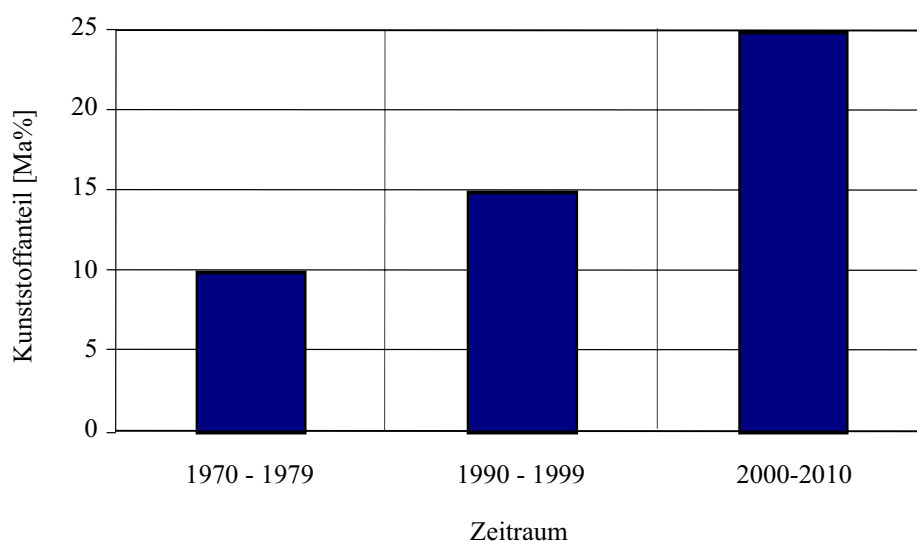


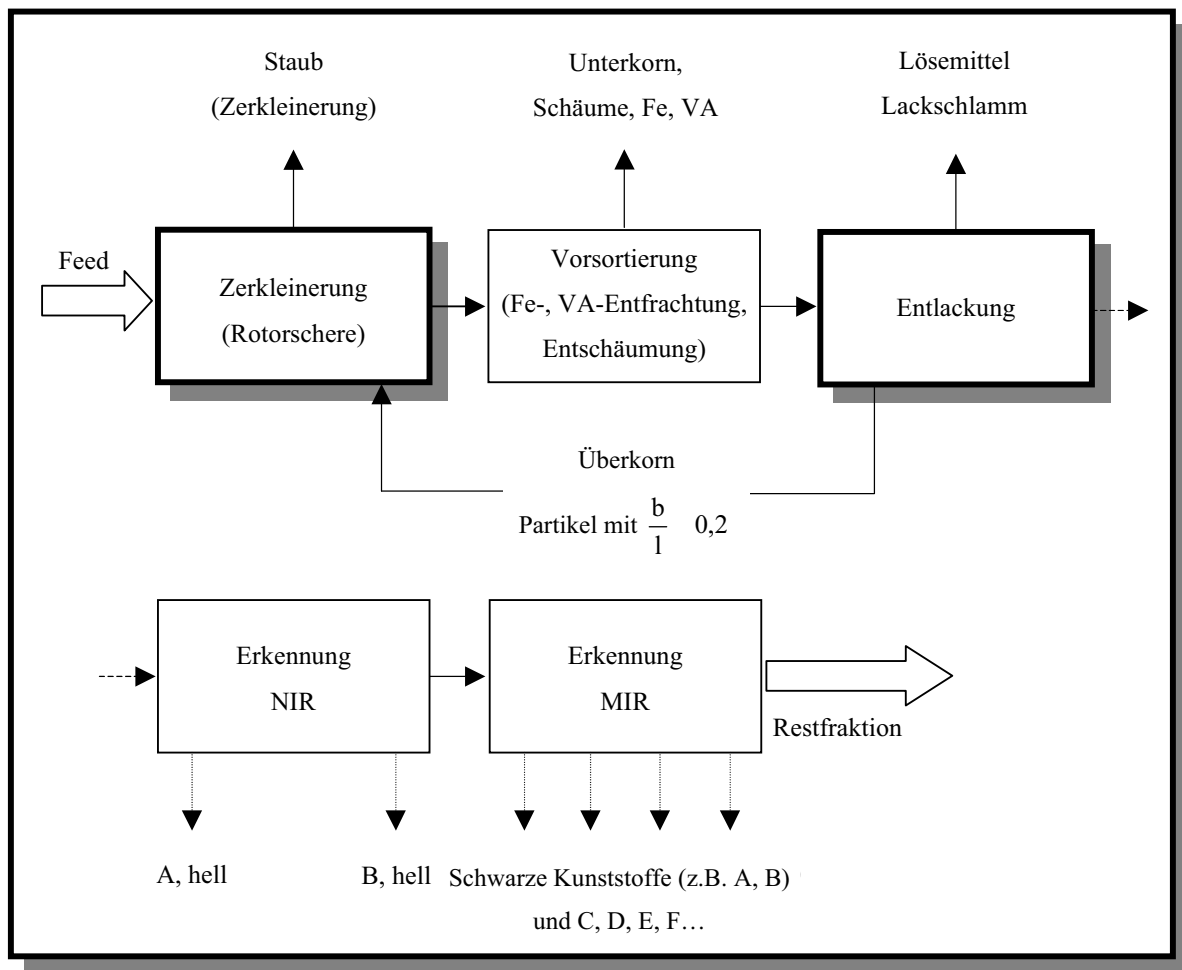
Abb. 1-1: Entwicklung des massenspezifischen Kunststoffanteils in Fahrzeugen [2]

Eine Vorgabe des Gesetzgebers ist es, die zu recycelnden Kunststoffe erneut in technisch anspruchsvollen Anwendungen einzusetzen. Hierbei besteht der Anspruch, Polymere, die bisher z.B. der thermischen Verwertung zugeführt werden mussten, wieder in den Materialkreislauf einzugliedern. Dazu ist eine hochselektive Trennung, d.h. Reinheiten je Kunststoffsorte von minimal 95 % [135], unabdingbar, die durch händische Demontage von komplexen Bauteilen erreicht werden kann. Eine solche Vorgehensweise ist allerdings bei bis zu 40 verschiedenen Kunststoffsorten nicht wirtschaftlich [1, 2, 145].

Der steigende Kunststoffanteil, die gesetzlichen Rahmenbedingungen und das Fehlen geeigneter Technologien zur Bereitstellung entsprechender Rezyklate zwingen die Automobilbranche zum Handeln. Daher erfolgte die Initiierung eines firmenübergreifenden BMBF-Projektes mit dem Ziel, ein Aufbereitungs- und Sortierverfahren zu entwickeln, das den speziellen Anforderungen einer Wiederverwertung der in Kraftfahrzeugen verwendeten Kunststoffe gerecht wird. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen und Verfahrensentwicklungen stellen einen zentralen Punkt innerhalb dieses Projektes dar.

Nach dem Stand der Technik übliche und umfangreich dokumentierte Kunststoffaufbereitungsverfahren [51, 146, 147, 148, 149, 150] scheiden unter anderem durch Materialvielfalt und -heterogenität sowie hohe Füllstoffgehalte (Ruß, mineralische und Glasfaserverstärkungen) aus. So sind z.B. die Dichtentrennung [147, 148] oder die beim Dualen System Deutschland (DSD) angewandten, optischen Sortierprozesse [149, 150] nicht bzw. nur partiell nutzbar. Es kommt deshalb zur Identifikation der Kunststoffsorte neben einem Nahinfrarot-(NIR)-Spektrometer eine modifizierte Messzeile zum Einsatz, die im mittleren Infrarotbereich (MIR) arbeitet. Dieses kombinierte Detektionsprinzip ermöglicht im dynamischen Messprozess bei wirtschaftlich interessanten Durchsätzen erstmals die Erkennung der im Automobilbau häufig benutzten [133], hochgeschwärzten Kunststoffe (s. Abb. 1-2).

Essentiell für die erfolgreiche Sortierung ist eine spezielle Konditionierung der Materialien, die außerdem die Voraussetzung für einen Wiedereinsatz der Polymere in hochwertigen Applikationen darstellt und damit ein wirtschaftliches Betreiben des Verfahrens gewährleistet. Für den modular aufgebauten Aufbereitungsprozess kommen hierbei den Stufen der Aufschlusszerkleinerung und physiko-chemischen Entlackung besondere, zentrale Bedeutung zu.



- Aufzubereitendes Gut
- Sortierte Hartkunststofffraktionen
- ▭** Schwerpunkte der Dissertation

Abb. 1-2: Gesamtverfahrenskonzept zur automatischen Sortierung von Kunststoffen aus dem Kfz-Bereich [65]

Die kritische Analyse und Bewertung dieser Module sind Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit (Abb. 1-2). Dafür notwendige grundlagen- und verfahrenstechnisch orientierte Untersuchungen (s. Kap. 3 und 4) erfordern bzgl. der Komplexität und der Art der angestellten Betrachtungen in wesentlichen Teilen neue Ansätze. Diese bilden die Basis für die abschließend dokumentierte Verknüpfung sämtlicher Anlagenkomponenten zu einem automatischen Kunststoffaufbereitungs- und Sortierverfahren (s. Kap. 5). Eine Überführung der Anlage in die industrielle Produktion soll bis April 2004 abgeschlossen sein.

## 2 Zielstellung

Aus der kritischen Analyse der Problemstellung, d.h. einer optimalen Konditionierung der Kunststoffe zur Gewährleistung der angestrebten Sortierergergebnisse resultiert die Notwendigkeit der Bearbeitung verschiedener verfahrenstechnischer Aufgaben.

Zuerst muss die Auswahl und Optimierung eines geeigneten Zerkleinerungsmoduls für verschiedene komplexe Kunststoffbaugruppen aus Altfahrzeugen erfolgen (Kap. 3). Dazu sind im Hinblick auf maximale Durchsätze und Reinheiten des Sortiermoduls Betrachtungen zu Partikelgrößenverteilungen, Aufschlussgraden und Form- bzw. Symmetriekennwerten erforderlich. Weiterhin sind das Energieaufnahmeverhalten und damit die Effektivität sowie die Durchsatzleistungen der jeweiligen Zerkleinerungseinheit zu prüfen. In Anlehnung an den zu realisierenden Aufbereitungsprozess werden Untersuchungen für verschiedene Kunststoffbaugruppen, ein repräsentatives Gemisch verschiedener Fahrzeugteile und für Modellkörper unter Variation wesentlicher Parameter des Zerkleinerungsprozesses (Rotorumfangsgeschwindigkeit, Durchmesser der Austragsrostöffnungen) durchgeführt.

Nach Zerkleinerung und Vorsortierung mittels Metallabscheidung, Siebung und Windsichtung durchlaufen die Materialien den Prozessschritt zur Entfernung der oberflächlichen Beschichtungsstruktur. Aufgrund der außerordentlichen Bedeutung des Entlackungsvorganges für den Gesamtprozess<sup>1</sup> und der in bisherigen Arbeiten lediglich für einzelne Materialsysteme empirisch beleuchteten Einflussgrößen [u.a. 61, 151] lassen sich die nötigen Untersuchungen für den zweiten Schwerpunkt der vorliegenden Dissertation ableiten. So umfasst die Entwicklung und Optimierung einer Entlackungseinheit für versiegelte Kunststoffoberflächen aus dem Fahrzeugaußenbereich (Kap. 4) die systematisch-komplexe Diskussion der grundlegenden physikalischen und chemischen Phänomene in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Lösemittels und der Prozesstemperatur. In diesem Zusammenhang sind die strukturmorphologische Degeneration der Beschichtungsmatrix zu erörtern und Diffusions-, Quell- und Entlackungskinetiken zu identifizieren. Dies dient sowohl einer qualitativen Modellierung als auch der analytischen Beschreibung (Bruttoprozessmodell) des Entschichtungs Vorganges. Ausgehend von Untersuchungen an Modellsystemen ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf technische Bauteile und verschiedene hydrodynamische Bedingungen zu verifi-

---

<sup>1</sup> Erst durch die Entschichtung wird eine Identifizierung und der Einsatz der Rezyklate in technisch anspruchsvollen Anwendungen ermöglicht.

zieren. Abgerundet werden die Arbeiten durch direkt umsetzungsbezogene Betrachtungen zur großtechnischen Realisierung der Entlackung.

Im Verlauf der Analyse und Charakterisierung der Aufbereitungsstufen ist die Qualität der Konditionierung fortlaufend mittels erreichter Identifikations- bzw. Sortierresultate zu bewerten.

Abschließend ergibt sich im Rahmen der Verfahrenskonzipierung der Bedarf zur ganzheitlichen Betrachtung des entwickelten Recyclingprozesses (Kap. 5). In diese muss, orientiert an der Zielstellung der Dissertation, der Erfolg der infrarotspektrometrischen Kunststoffsortierung, d.h. erzielte Reinheiten und Ausbeuten anhand verschiedener Sortieraufgaben, einbezogen werden. Weiterhin ist ein Verfahrensdesign aufzustellen und damit die Verknüpfung der Einzelmodule zum Gesamtverfahren der automatischen Kunststoffaufbereitung und -sortierung entsprechend Abb. 1-2 zu realisieren. Einem solchen Konzept entsprechend werden final Massenströme und Ausbeuten für den gesamten Prozess am Beispiel der Aufbereitung von Stoßfängern bilanziert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den zitierten Kapiteln detailliert dargestellt und interpretiert.

### 3 Untersuchungen zur Zerkleinerungsstufe

Die Betrachtungen des vorliegenden Abschnittes erfolgen, resultierend aus der in Kap. 2 definierten Problemstellung unter dem Gesichtspunkt der Auswahl und Optimierung einer Zerkleinerungseinheit für verschiedene Kunststoffbaugruppen.<sup>2</sup> Die Zerkleinerungsprodukte sollen unter Berücksichtigung theoretischer Erkenntnisse und Ansätze [4, 22] durch systematisch-verfahrenstechnische Untersuchungen im industriellen Maßstab den Anforderungen der nachfolgenden Identifikations- und Sortierstufe angepasst (Abb. 1-2, s.a. Kap. 5) und somit die Grundlage für einen erfolgreichen Wiedereinsatz der Materialien geschaffen werden.

Aufgrund des Eigenschaftsprofils der zu zerkleinernden Werkstoffverbunde ist die Entwicklung spezifischer Methoden zur Charakterisierung von Zerkleinerungsprozess und -produkten erforderlich (s.a. Abb. 3.2-2). Dabei ist es im Zuge der Betrachtungen zur Effektivität der Zerkleinerungsaggregate erstmals möglich, mit Hilfe optisch bestimmter, mittlerer Dimensionen der Partikel ( $x_{50}, \frac{b}{l}$ , s. Abschnitt 3.3.1), die durch die Zerkleinerung innerhalb der Partikelkollektive neu entstandene Oberfläche zu quantifizieren. Dies gewährleistet eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen und -parameter in Bezug auf den zerkleinerungsspezifischen Wirkungsgrad.

Die Sortierung der in Zusammensetzung und konstruktiver Ausführung zum Teil sehr komplexen Bauteile (Tab. 3.2-2) stellt bedeutende Anforderungen an den wirtschaftlich zu gestaltenden Zerkleinerungsprozess. Zu erzielen sind hohe Kunststoffausbeuten  $A_Z$  und Aufschlussgrade ( $Z$ ), enge Partikelgrößenverteilungen mit überwiegendem Anteil  $Y$  von Partikeln im gewünschten Größenintervall von  $20 \text{ mm} \leq x_c \leq 80 \text{ mm}$  sowie ein minimierter Energiebedarf bei gleichzeitig maximalen Durchsätzen. Konkret liegen die Vorgaben für einen wirtschaftlichen Betrieb der Gesamtanlage bei minimal  $A_Z = 75 \text{ Ma}\%$ ,  $Z = 80 \text{ Ma}\%$  und  $Y = 90 \text{ Ma}\%$ .

Daher erfolgen zuerst Betrachtungen an unterschiedlichen, beim Kunststoffrecycling häufig eingesetzten Axial- bzw. Radialspalt-Rotorscheren,<sup>3</sup> um die generelle Eignung solcher Systeme zur Gewährleistung entsprechender Produktqualitäten<sup>4</sup> zu klären. Gleichzeitig sind die

---

<sup>2</sup> s. Tab. 3.2-2 und A3.2-3

<sup>3</sup> Die Zuordnung erfolgte in Anlehnung an [5].

<sup>4</sup> Nach Schubert und Bernotat [5] finden Rotorscheren vorwiegend zur Bereitstellung von Stückgrößenverteilungen und -klassen Verwendung.

wichtigsten Einflussgrößen auf das Zerkleinerungsergebnis zu bestimmen. Hierbei gewonnene Erkenntnisse dienen der Auswahl des geeignetsten Aggregates (Abb. 3.2-2) und bilden die Grundlage für weitere Modifikationen dieser Einheit hinsichtlich der optimalen Auslegung des Gesamtverfahrens.