



## **Suderburger Working Paper No 23**

# **Neue Zerkleinerungstechnologien zur Zerkleinerung von Leiterplatten (Platinen) beim Recycling von Elektroschrott**

Kai Quester und Markus Launer

September 2024

A Working paper by Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Braunschweig /  
Wolfenbüttel, Standort Suderburg, Fakultät H, Studiengang Handel und Logistik

Herbert-Meyer-Straße 7, 29556 Suderburg, [www.ostfalia.de/cms/de/h/](http://www.ostfalia.de/cms/de/h/)

DOI: 10.13140/RG.2.2.20935.61604, ISSN 2198-9184

<https://www.ostfalia.de/cms/en/pws/launer/working-papers/>

**Herausgegeben von:**

Prof. Dr. Markus A. Launer  
Herbert-Meyer-Straße 7  
29556 Suderburg  
m-a.launer@ostfalia.de

Prof. Dr. Markus A. Launer ist Professor für ABWL und Dienstleistungsmanagement an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften am Standort Suderburg. Dort sind seine Schwerpunktgebiete zudem eBusiness, International Management, Controlling, Finanzierung, ABWL und Wissenschaftliches Arbeiten. Parallel ist er Dozent an der Fresenius Hochschule und International School of Management. Zuvor war er an der Hamburg School of Business Administration (HSBA) tätig. Er hat über 20 Jahre Erfahrung aus der Industrie im In- und Ausland sowie in Groß-, Mittel- und Kleinunternehmen, davon 9 Jahre in den USA.

**Autoren:**

Kai Quester (Recycling Experte)  
Prof. Dr. Markus A. Launer

**Bibliographische Informationen**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung und die Einspeicherung, Verarbeitung und Übermittlung in elektronischen Systemen.

# Inhalt

|   |               |
|---|---------------|
| <b>ABSTRACT</b>   | <b>- 1 -</b>  |
| <b>1. EINFÜHRUNG</b>  | <b>- 2 -</b>  |
| <b>2. LITERATURANALYSE</b>  | <b>- 5 -</b>  |
| 2.1 INNOVATIVE WERTSCHÖPFUNGSKETTEN: FORTSCHRITTE BEI DER RÜCKGEWINNUNG KRITISCHER ROHSTOFFE<br>AUS ELEKTROSCHROTT FÜR DIE WIRTSCHAFTLICHE WIDERSTANDSFÄHIGKEIT EUROPAS | - 5 -         |
| 2.2 EINFÜHRUNG RECYCLING VON ELEKTROSCHROTT   | - 7 -         |
| 2.3 MECHANISCHEN TRENNUNG VON LEITERPLATTENABFÄLLEN   | - 7 -         |
| 2.4 INNOVATIVE VORBEHANDLUNG VOR DER KONVENTIONELLEN ZERKLEINERUNG  | - 10 -        |
| 2.5 HOCHSPANNUNGSIMPULS UND ELEKTRODYNAMISCHE FRAGMENTIERUNG  | - 12 -        |
| 2.6 ABRASIVES WASSERSTRAHLSCHNEIDEN   | - 13 -        |
| 2.7 RECYCLING VON GESCHREDDERTEN LEITERPLATTEN MIT HILFE VON 2-PHASEN-WELLENFÖRDERERN.  | - 14 -        |
| 2.8. TECHNOLOGIEENTWICKLUNG FÜR DIE TRENNUNG VON MEHRSCICHTVERBÜNDEN  | - 15 -        |
| 2.9. DIE HYDROMETALLURGISCHE RÜCKGEWINNUNG KRITISCHER UND WERTVOLLER ELEMENTE AUS DEM<br>SCHREDDERSTAUB VON ELEKTRO- UND ELEKTRONIKALTGERÄTEN                           | - 15 -        |
| 2.10 MECHANOCHEMISCHE AKTIVIERUNG ZUR BESSEREN ENTFERNUNG VON GRENZFLÄCHENVERUNREINIGUNGEN:<br>AKTUELLE ENTWICKLUNGEN UND GÄNGIGE TECHNIKEN                             | - 19 -        |
| <b>3. EIN INNOVATIVES MAGNETISCHES DICHTE-TRENNUNGSVERFAHREN ZUM SORTIEREN<br/>KÖRNIGER FESTSTOFFE</b>  | <b>- 22 -</b> |
| <b>4. EIN HOCHPRODUKTIVER BIOPROZESS ZUR GEWINNUNG VON METALLISCHEM KUPFER AUS<br/>LEITERPLATTEN (PCBS)</b>   | <b>- 22 -</b> |
| 5. SELEKTIVE TRENNUNG VON METALLEN AUS LEITERPLATTENABFÄLLEN DURCH SUPERGRAVITATIONS-<br>UNTERSTÜTZTE VERFLÜSSIGUNGSTECHNOLOGIE   | - 27 -        |
| <b>6. ABSCHÄTZUNG DER UNSICHERHEIT DES METALLGEHALTS IN EINER CHARGE VON<br/>ABFALLLEITERPLATTEN AUS COMPUTER-MOTHERBOARDS</b>  | <b>- 27 -</b> |
| <b>7. BEWERTUNG DER WIRKSAMKEIT DER DICHTEBASIERTEN SORTIERUNG VON KUNSTSTOFFEN<br/>AUS ELEKTRO- UND ELEKTRONIK-ALTGERÄTEN</b>  | <b>- 30 -</b> |
| <b>8. RECYCLING OF WASTE PRINTED CIRCUIT BOARDS BY MECHANICAL MILLING</b>   | <b>- 35 -</b> |
| <b>9. ÜBERBLICK ÜBER DIE ROLLE DER DICHTEBASIERTEN TRENNUNG BEIM PCB-RECYCLING</b>  | <b>- 37 -</b> |
| <b>10. FALLSTUDIE INDIEN: UNTERSUCHUNG DER RECYCLINGABSICHTEN VON HAUSHALTEN IN<br/>BEZUG AUF ELEKTROSCHROTT</b>  | <b>- 38 -</b> |
| <b>11. FAZIT UND AUSBLICK</b>   | <b>- 42 -</b> |
| <b>12. REFERENZEN</b>   | <b>- 44 -</b> |

## **Abstract**

Die steigende Menge an Elektroschrott (E-Schrott) stellt eine zunehmende Herausforderung für Gesellschaft und Umwelt dar, insbesondere im Hinblick auf alte Leiterplatten (WPCBs), die ein unverzichtbarer Bestandteil der Elektronikfertigung sind. Angesichts der zunehmenden Knappheit natürlicher Ressourcen aus Bergwerken hat die Europäische Union den Critical Raw Material Act verabschiedet, der vorsieht, dass kritische Rohstoffe die EU nicht mehr verlassen dürfen, sondern recycelt werden müssen. In diesem Kontext sind WPCBs von zentraler Bedeutung, da sie nicht nur selten vorkommen und einen hohen Wert besitzen, sondern auch in großen Produktionsmengen anfallen. Dies macht eine effektive Rückgewinnung und Wiederverwertung dieser Komponenten besonders dringlich.

Ein zentraler Schritt im Recyclingprozess von WPCBs ist das Zerkleinern, das die Freisetzung wertvoller Materialien ermöglicht und die Grundlage für nachfolgende Recyclingprozesse schafft. Dieses Arbeitspapier bietet eine umfassende Untersuchung der Zerkleinerungstechniken für WPCBs. Es analysiert die Struktur, die verschiedenen Typen und die Zusammensetzung der Leiterplatten, wobei besonderes Augenmerk auf ihre mechanischen Eigenschaften gelegt wird, die maßgeblich den Zerkleinerungsprozess beeinflussen.

Ein Schwerpunkt dieses Arbeitspapiers liegt auf der kritischen Betrachtung neuer mechanischer Zerkleinerungsmaschinen, einschließlich Hammermühlen und Rotorschredder, die seit neuestem für die Verarbeitung von WPCBs eingesetzt werden. Dabei wurden die Stärken und Schwächen dieser Technologien evaluiert, insbesondere in Bezug auf ihre Effizienz, Nachhaltigkeit und die Herausforderungen, die durch die komplexe Materialzusammensetzung der WPCBs entstehen.

Die Literatur zu diesem Thema wurde systematisch überprüft, um bestehende Forschungslücken und Inkonsistenzen zu identifizieren. Basierend auf dieser Analyse schlägt das Arbeitspapier zukünftige Forschungsrichtungen vor, die darauf abzielen, die Effizienz und Nachhaltigkeit der WPCB-Zerkleinerung weiter zu verbessern. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der Entwicklung innovativer Technologien, die sowohl ökologischen als auch wirtschaftlichen Anforderungen gerecht werden.

Dieser Artikel ist eine umfassende Übersetzung, Überarbeitung und Erweiterung des Artikels von Abbadi, Rácz & Bokányi (2024) und stellt einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung von Recyclingverfahren dar, die angesichts der globalen Rohstoffknappheit und der zunehmenden Bedeutung von Kreislaufwirtschaft unverzichtbar sind.

Dieser Artikel bietet auch eine Analyse der neuesten Recyclingprozesse von WPCBs (Waste Printed Circuit Boards) und beleuchtet dabei die neuesten Schritte und Technologien zur Rückgewinnung wertvoller Materialien. Die Untersuchung zeigt, dass eine Vorbehandlung von entscheidender Bedeutung ist, da sie dazu beitragen kann, bis zu 90 % der Komponenten zu entfernen und die Delamination von WPCBs zu erleichtern. Dieser Schritt legt die Grundlage für eine effektive Trennung und Rückgewinnung von Rohstoffen (Hao, Wang, Wu & Guo, 2020).

Besonders der Anreicherungsprozess von Metallen erweist sich als wesentlicher Faktor, da er die Rückgewinnungseffizienz signifikant steigert und somit die wirtschaftliche und ökologische Rentabilität verbessert. Im Artikel werden verschiedene Methoden des Metallrecyclings, wie hydrometallurgische, pyrometallurgische und mechanische Verfahren, untersucht und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile miteinander verglichen. Diese Analyse ermöglicht eine fundierte Entscheidungsbasis für die Auswahl der optimalen Technologie in Abhängigkeit von den spezifischen Anforderungen. Zudem werden zukunftsweisende Hybridverfahren vorgestellt, die traditionelle Recyclingtechniken kombinieren und durch innovative Ansätze ergänzen. Diese neuen Verfahren zielen darauf ab, die Effizienz weiter zu steigern, den Energieverbrauch zu senken und die Umweltbelastung zu minimieren. Der Artikel schlägt damit eine klare Richtung für die Weiterentwicklung des WPCB-Recyclings vor und bietet wertvolle Einblicke in die Technologien und Prozesse, die das Metallrecycling der Zukunft prägen könnten (Hao, Wang, Wu & Guo, 2020).

## **1. Einführung**

Dieses Arbeitspapier bietet eine umfassende und detaillierte Analyse der neuesten Verfahren zur Zerkleinerung von WPCBs (Waste Printed Circuit Boards), einem essenziellen Prozessschritt bei der Rückgewinnung und dem Recycling wertvoller und kritischer Rohstoffe. Diese Rohstoffe spielen eine entscheidende Rolle in der modernen Technologie und sind für die Herstellung zahlreicher elektronischer Geräte unverzichtbar.

Das Papier untersucht gründlich die Struktur, die verschiedenen Typen und die chemische sowie physikalische Zusammensetzung von WPCBs. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf ihre mechanischen Eigenschaften wie Zug-, Druck- und Biegefestigkeit sowie ihre thermischen und chemischen Widerstandsfähigkeiten gelegt. Diese Eigenschaften sind von zentraler Bedeutung, da sie die Effizienz und Effektivität der Zerkleinerungsprozesse maßgeblich beeinflussen.

Durch die umfassende Darstellung der komplexen Materialzusammensetzung von WPCBs wird nicht nur ein tieferes Verständnis der Herausforderungen im Recyclingprozess ermöglicht, sondern auch die Grundlage für die Weiterentwicklung effizienterer und nachhaltigerer Technologien geschaffen. Dieses Wissen ist entscheidend, um die Rückgewinnungsraten wertvoller Metalle wie Gold, Silber, Palladium und Kupfer zu maximieren und gleichzeitig die Umweltauswirkungen des Recyclingprozesses zu minimieren.

Das Arbeitspapier liefert tiefgreifende Einblicke in aktuelle Technologien und Verfahren im Bereich des WPCB-Recyclings (Waste Printed Circuit Boards). Neben der Darstellung neuester Entwicklungen werden gezielt Forschungslücken und Herausforderungen aufgezeigt, die bei der Weiterentwicklung innovativer Ansätze dringend adressiert werden müssen. Es bietet somit nicht nur eine umfassende Bestandsaufnahme, sondern auch eine strategische Orientierungshilfe für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

Besonders hervorzuheben ist die detaillierte Analyse moderner Zerkleinerungstechnologien wie Hammermühlen, Rotorschredder und Schneidmühlen. Das Papier beschreibt präzise deren Funktionsweisen, Einsatzgebiete und Leistungsmerkmale sowie die jeweiligen Vor- und Nachteile. Diese Technologien werden hinsichtlich ihrer Eignung für die Verarbeitung unterschiedlichster Materialzusammensetzungen von WPCBs kritisch beleuchtet.

Ein zentrales Augenmerk liegt auf den spezifischen Herausforderungen, die mit der Zerkleinerung von WPCBs verbunden sind. Die heterogene Materialstruktur, der hohe Glasfaseranteil und die Dichte an eingebetteten Metallen machen WPCBs zu einer anspruchsvollen Materialklasse. Diese Eigenschaften erfordern eine präzise Abstimmung der Zerkleinerungstechnologie, um effiziente Ergebnisse zu erzielen. Besonders problematisch ist die abrasive Wirkung der Glasfasern, die Schneidwerkzeuge schnell abstumpfen lassen, sowie die hohe Belastung der Maschinen durch die Metalleinschlüsse.

Das Arbeitspapier unterstreicht die Notwendigkeit innovativer Technologien, die diese Herausforderungen bewältigen können, und schlägt Kombinationen mechanischer und physikalischer Verfahren vor, um sowohl die Materialtrennung als auch die Rückgewinnung wertvoller Metalle zu optimieren. Darüber hinaus werden Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Minimierung von Umweltauswirkungen erörtert, was die ökologische und wirtschaftliche Nachhaltigkeit des gesamten Recyclingprozesses fördert.

Dieser Artikel versucht, einen umfassenden Überblick über den gesamten Metallrückgewinnungsprozess zu geben, von den grundlegenden Eigenschaften von PCBs über die Vorbehandlung, Anreicherung von Metallen bis hin zur Reinigung und Rückgewinnung von Metallen. Verschiedene Anlagentechnologien und die Probleme der verschiedenen Methoden werden ausführlich erörtert, wobei die Rückgewinnung von unedlen Metallen und die Rückgewinnung von Edelmetallen gesondert vorgestellt werden, um eine klare logische Übersicht für das Metallrecycling zu bieten. (Hao, Wang, Wu & Guo, 2020).

Aufgrund kontinuierlicher technologischer Innovationen und der Verbesserung des Lebensstandards werden große Mengen an Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) produziert. Aufgrund ihrer reichhaltigen Metallzusammensetzung gelten alte Leiterplatten (WPCBs) als wertvollste Komponente unter den Elektro- und Elektronik-Altgeräten. Das Recycling von Metallen aus WPCBs mit ungeeigneten Methoden oder im informellen Sektor ist ein lukratives Geschäft, das jedoch Ressourcen verschwendet und der Umwelt und der menschlichen Gesundheit schadet. Geeignete, umweltfreundliche Methoden zur Rückgewinnung von Metallen aus WPCBs sind daher für Industrie und Politik dringend und unverzichtbar. In diesem Artikel werden die technischen Details von Metallrecyclingprozessen auf der Grundlage früherer Forschungsbemühungen untersucht, um ein vollständiges Bild des aktuellen Status zu erhalten. Die Vorteile und Probleme mehrerer herkömmlicher Methoden werden zusammengefasst und hinsichtlich Kosten, Umweltauswirkungen und Rückgewinnungseffizienz verglichen. Mögliche Ansätze zur Verbesserung mechanischer

Behandlungs- und Biolaugungsmethoden werden dementsprechend analysiert. Neuartige Hybridprozesse wie Chelattechnologie und Biolaugungsprozess, grüne Adsorption und chemische Laugung usw. werden vorgestellt, um Möglichkeiten für Kopplungsprozesse mehrerer Technologien für das Metallrecycling aus WPCBs zu eröffnen (Hao, Wang, Wu & Guo, 2020).

Aufgrund rascher technologischer Innovationen und einer Marktexpansion ist die Menge an Elektro- und Elektronik-Altgeräten in den letzten Jahrzehnten rasant gestiegen. Nach Angaben der Vereinten Nationen (UN) wurden 1992 14 Millionen Tonnen Elektro- und Elektronik-Altgeräte erzeugt, 2002 waren es bereits 24 Millionen Tonnen, und wie in Abb. 1 dargestellt, hat sich die Menge im Jahr 2016 auf 47,7 Millionen Tonnen mehr als verdreifacht (Kaya, 2016; StEP, 2018). Die Elektronikindustrie ist der größte Nachfragesektor für Metalle, insbesondere Edelmetalle. Daher könnten Elektro- und Elektronik-Altgeräte als wichtige Ressource für das Metallrecycling verwendet werden, wenn Elektronikgeräte entsorgt werden. Laut den neuesten statistischen Daten der Universität der Vereinten Nationen (UNU), der Internationalen Fernmeldeunion (ITU) und der International Solid Waste Association (ISWA) wurden 2016 jedoch nur 20 % der Elektro- und Elektronik-Altgeräte mithilfe informeller oder illegaler Recyclingmethoden gesammelt und recycelt (Baldé et al., 2017; Wang und Xu, 2015). Die Recyclingquoten der verschiedenen Länder variieren stark. In den meisten Ländern liegen sie unter 50 %, was zu erheblicher Ressourcenverschwendung und schwerwiegenden Umweltverschmutzungen führt (Verma et al., 2017a).

In den letzten Jahrzehnten hat das Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten stark an Bedeutung gewonnen und mehrere innovative Geschäftsmodelle für das Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten erwiesen sich als unerlässlich, um enorme Vorteile zu erzielen (Cucchiella et al., 2015). WPCBs, der Hauptbestandteil von Elektro- und Elektronik-Altgeräten, machen etwa 3 Gewichtsprozent aus und enthalten etwa 60 Arten von Elementen (Hadi et al., 2013; Yang et al., 2019). Unter den verschiedenen Bestandteilen von WPCBs machen Metalle etwa 30 Gewichtsprozent aus, was deutlich mehr ist als bei natürlichen Mineralien, darunter unedle Metalle (Cu, Zn), Edelmetalle (Au, Ag, Pd) und Schwermetalle (Cayumil et al., 2016; Chen et al., 2015a,b; Shibayama et al., 2013). Derartige komplexe Zusammensetzungen machen das Recycling von WPCBs zu einem bedeutenden, aber auch gefährlichen Prozess. Einige Metallrecyclingtechnologien wie physikalische, chemische, pyrometallurgische, hydrometallurgische und biometallurgische Prozesse wurden umfassend untersucht (Kim et al., 2011; Wang et al., 2017). Dennoch weisen viele Technologien aufgrund der Komplexität von WPCBs immer noch bestimmte technische Mängel auf. Beispielsweise weisen die physikalischen Prozesse eine niedrige Rückgewinnungseffizienz und einen hohen Energieverbrauch auf (Alabi et al., 2012). Die Pyrometallurgie erfordert spezielle Geräte für den Hochtemperaturbetrieb und erzeugt staubige und giftige Gasschadstoffe. Gleichzeitig ist der Verbrauch chemischer Reagenzien hoch, was die Kosten erhöht. Im Vergleich zu den oben genannten Methoden hat die Hydrometallurgie viele Vorteile gezeigt, darunter eine hohe Auslaugungseffizienz, eine gute Betriebsumgebung und einen

kontinuierlichen und automatisierten Prozess. Es ist jedoch nicht möglich, mit einem einzelnen hydrometallurgischen Ansatz alle Metalle vollständig zurückzugewinnen, ohne andere Technologien in Zusammenarbeit anzuwenden.

Die meisten bisher veröffentlichten Literaturartikel zum Recycling von WPCBs konzentrieren sich hauptsächlich auf die Auswirkungen von Ressourcen, Politik, Gesetzgebung oder Umwelt auf die Materialrückgewinnung (Awasthi et al., 2016; Chen et al., 2016, Kiddeeet al., 2013, Kumar et al., 2017, Song und Li, 2014, Zhang und Xu, 2016). Einige Artikel befassten sich mit den Auslaugungs- oder Rückgewinnungsprozessen einzelner Metalle. Awasthi und Li (2017) und Isildar et al. (2018) beschrieben die Metallrecyclingtechnologien, darunter physikalische Methoden, Pyrometallurgie und Biohydrometallurgie. Darüber hinaus wurden einige kombinierte Prozesse wie die mechanische Behandlung mit biologisch abbaubaren Reagenzien oder die Auslaugung organischer Säuren diskutiert, um hohe Auslaugungsraten von Metallen zu erreichen. Allerdings konzentrierten sich nur sehr wenige Untersuchungen auf den gesamten Metallrecyclingprozess und lieferten einen gründlichen Vergleich zwischen verschiedenen Methoden (Akcil et al., 2015; Lu und Xu, 2016).

## **2. Literaturanalyse**

### **2.1 Innovative Wertschöpfungsketten: Fortschritte bei der Rückgewinnung kritischer Rohstoffe aus Elektroschrott für die wirtschaftliche Widerstandsfähigkeit Europas**

Tolusso et al. (2024) untersucht die entscheidenden Fortschritte und Herausforderungen beim Recycling kritischer Rohstoffe (CRMs) innerhalb der Europäischen Union, mit einer fokussierten Untersuchung von Leiterplatten (PCBs) und Seltenerd-Permanentmagneten (RE-PMs). Aus der Perspektive mehrerer von Europa finanzierter Projekte – New-RE, RENEW, INSPIREE, CIRC-UITs und HARMONY – befasst sich die Studie mit innovativen Recyclingtechnologien und -methoden, die darauf abzielen, die Effizienz und Nachhaltigkeit der Materialrückgewinnung zu verbessern. Sie hebt die erheblichen Hürden bei der Sammlung und Lieferkette von Sekundärrohstoffen aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) hervor und betont die Notwendigkeit verbesserter Sammelmechanismen und strategischer Materialrückgewinnung zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft. Darüber hinaus erörtert das Dokument die Integration recycelter Materialien in den Markt und identifiziert die bestehenden Lücken bei den Verarbeitungs- und Fertigungskapazitäten in Europa. Indem die Studie das Potenzial gemeinsamer Anstrengungen und technologischer Innovationen zur Überwindung dieser Herausforderungen aufzeigt, liefert sie wertvolle Erkenntnisse zur Schaffung einer nachhaltigeren und widerstandsfähigeren Lieferkette für CRMs, die für das Wirtschaftswachstum und die ökologische Nachhaltigkeit der EU von entscheidender Bedeutung ist.

#### **Komponentenextraktion**



Um die wertvollen Bestandteile der Zielprodukte zurückzugewinnen, ist allerdings ein weiterer Vorbehandlungsschritt erforderlich, der die Demontage umfasst.

Nachdem Elektro- und Elektronik-Altgeräte in speziellen Elektro- und Elektronik-Aufbereitungsanlagen manuell zerlegt oder geschreddert wurden, werden PCBs und andere interne Komponenten (z. B. gefährliche) vom Rest des Materialflusses getrennt. PCBs werden dann manuell sortiert und in viele verschiedene Kategorien unterteilt. Einige Beispiele für diese Kategorien sind Telekommunikations-PCBs, Laptops der neuen oder alten Generation, PCBs aus Stromanwendungen, Festplatten-PCBs und sogar bis zu 20 weitere Kategorien. Eine erste Annäherung kann diese Kategorien basierend auf einer wirtschaftlichen Bewertung in 3 Makroklassen gruppieren: PCBs mit hohem, mittlerem und niedrigem Wert.

WEEE-Behandlungsmitarbeiter werden darin geschult, die Sortiervorgänge nach optischen Merkmalen der Leiterplatten durchzuführen und dabei Merkmale zu berücksichtigen, die durch eine visuelle Inspektion der Materialien erkannt werden können: z. B. Quellgerät, Farbe, Vorhandensein bestimmter Komponenten und Abmessungen. Ziel dieser manuellen Sortierschritte ist es, eine homogene Zusammensetzung aus Edelmetallen und CRMs zu erhalten, um die Verdünnung dieser Metalle im Recyclingschritt zu minimieren.

Das CIRC-UTS-Projekt führt ein Pilotprojekt mit dem Ziel durch, die Sortierschritte am Ende des Lebenszyklus elektronischer Komponenten zu digitalisieren. Das Pilotprojekt schlägt das Training einer KI-gestützten Software vor, die Leiterplatten verschiedener Kategorien erkennen kann, um den Sortierprozess schneller und zuverlässiger zu machen. Zu diesem Zweck wird ein Trainingsdatensatz mit Bildern verschiedener Leiterplatten erstellt, die nach Klasse und wirtschaftlichem Wert unterteilt sind.

Dieses System wird in einer realen Industrieumgebung als Unterstützung für manuelle Vorgänge in WEEE-Behandlungsanlagen getestet.

New-RE entwickelt eine automatisierte Demontagelinie für HDDs, einen der gezielten Pilotabläufe für die PM-Rückgewinnung, die die Effizienz der Rückgewinnung im Vergleich zur manuellen Demontage oder normalen Behandlungsvorgängen erheblich verbessern kann. Durch automatisierte oder manuelle Demontage bis auf Komponentenebene ergibt sich ein weiterer positiver Nutzen, da saubere Komponenten zurückgewonnen werden, die zu reineren Sekundärrohstoffen werden. Im Fall der New-RE-Demontagelinie für HDDs werden sowohl PMs als auch PCBs zurückgewonnen und zur weiteren Behandlung entlang der Wertschöpfungskette geschickt. PMs werden an die hydrometallurgische Anlage geschickt, die die magnetische Legierung behandeln und Seltenerdoxide zurückgewinnen kann, während PCBs einer weiteren mechanischen Vorbehandlung unterzogen werden können, um metallische Komponenten vom Epoxidsubstrat zu trennen und dem chemischen Recycler einen qualitativ hochwertigeren Input zu liefern.

## **2.2 Einführung Recycling von Elektroschrott**

Wie bei konventionellen mechanische Zerkleinerungsverfahren oft erläutert, werden Schreddern und Mahlen häufig zur Verarbeitung von WPCBs verwendet. Diese Verfahren weisen jedoch mehrere Nachteile auf, darunter einen hohen Energieverbrauch, eine übermäßige Bildung von Feinanteilen und eine geringe Rückgewinnungsrate wertvoller Metalle. Darüber hinaus besteht bei kontinuierlicher und direkter Zerkleinerung von WPCBs das Risiko der Entstehung hoher lokaler Temperaturen, die Pyrolyse und die Emission gefährlicher Substanzen auslösen können. Die Oberflächentemperatur von WPCBs kann 300–350 °C überschreiten, wenn sie länger als 3 s zerkleinert werden (Li, Duan, Yu & Wang, 2010).

Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurden mehrere neue Zerkleinerungstechnologien für die WPCB-Verarbeitung entwickelt. Diese Technologien zielen darauf ab, die Rückgewinnungsraten wertvoller Metalle zu verbessern, die Entstehung feiner Partikel zu verringern und den Energieverbrauch während des Zerkleinerungsprozesses zu senken. Jede Zerkleinerungstechnik hat bestimmte Vor- und Nachteile, wodurch die optimale Wahl kontextabhängig ist. Letztendlich kann der effektivste Zerkleinerungsprozess eine Kombination mehrerer Techniken umfassen, die auf bestimmte Ziele und Bedingungen zugeschnitten sind (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

## **2.3 Mechanischen Trennung von Leiterplattenabfällen**

Die Lebensdauer elektronischer Geräte hat sich aufgrund der Integration zahlreicher Anwendungen und des Dauerbetriebs dieser Geräte zunehmend verkürzt (Ellamparuthy et al., 2024). Die raschen Fortschritte bei elektronischen Geräten, die gestiegene Nachfrage und die Abhängigkeit von solchen Geräten haben in den letzten Jahrzehnten die Ansammlung von Elektroschrott (E-Schrott) erhöht. Darüber hinaus macht der Ausfall einiger Komponenten in elektronischen Einheiten oft den Austausch des gesamten Geräts erforderlich, was zur Entstehung von Elektroschrott beiträgt. Im Durchschnitt steigt der Verbrauch elektrischer und elektronischer Komponenten (EEE) jährlich um 2,5 Millionen Tonnen, was zu einem Anstieg der E-Schrott-Erzeugung führt (Isildar et al., 2017, Xu et al., 2023). Das mangelnde Bewusstsein der Öffentlichkeit und rudimentäre Abfallbewirtschaftungsmethoden führen in vielen Ländern dazu, dass Elektroschrott auf offenen Mülldeponien entsorgt oder mit Hausmüll vermischt wird (Ellamparuthy et al., 2024).

Nach Schätzungen des Global E-waste Monitor wurden im Jahr 2020 weltweit etwa 55,5 Millionen Tonnen Elektroschrott erzeugt (The Global E-waste Monitor-2020). Die Quantifizierung der Elektroschrotterzeugung ist jedoch aufgrund mangelhafter Sammel- und Trennungssysteme in Entwicklungsländern schwierig (Schluep et al., 2013). Viele Autoren haben die Erzeugung von Elektroschrott mit dem Bruttoinlandsprodukt (BIP) und der wirtschaftlichen Entwicklung des Landes in Verbindung gebracht (Huisman et al., 2010). Die gängigste Methode zur Schätzung der Menge des erzeugten Elektroschrotts ist die Marktanalyse der Produktion, des Verkaufs und der Lebensdauer des Geräts (Jain und Sareen, 2006). Abb. 1 veranschaulicht die Erzeugung von

Elektroschrott in verschiedenen Regionen der Welt. Der Literatur zufolge belief sich die weltweite Gesamtmenge an Elektroschrott im Jahr 2020 auf 55,5 Millionen Tonnen, wobei Asien mit etwa 24,9 Millionen Tonnen den größten Anteil hatte, gefolgt von Amerika (13,1 Millionen Tonnen), Europa (12 Millionen Tonnen), Afrika (2,9 Millionen Tonnen) und Ozeanien (0,7 Millionen Tonnen). Darüber hinaus beträgt die weltweite Pro-Kopf-Erzeugung von Elektroschrott 7,3 kg, wobei Europa mit 16,2 kg die höchste Pro-Kopf-Erzeugung aufweist, gefolgt von Ozeanien (16,1 kg), Amerika (13,3 kg), Asien (5,6 kg) und Afrika (2,5 kg). Beim Recycling von Elektroschrott wurden dagegen nur begrenzte Fortschritte erzielt. Die Recyclingraten liegen in allen Regionen unter 15 %, mit Ausnahme von Europa, wo eine Recyclingrate von 42,5 % erreicht wurde. Daher ist die Entsorgung von Elektroschrott zu einem ernsthaften globalen Problem geworden. Darüber hinaus nimmt die Produktion von Elektroschrott kontinuierlich zu und wird bis zum Jahr 2030 voraussichtlich 74,7 Millionen Tonnen erreichen, wie in Abb. 2 dargestellt (The global e-waste monitor-2020, Chakraborty et al., 2022, Zhu et al., 2023).

Die nachhaltige Bewirtschaftung von Elektroschrott hat sich zu einem Hauptanliegen entwickelt, da ein erheblicher Teil unbehandelt bleibt oder von informellen Sektoren entsorgt wird, was zu negativen Auswirkungen auf die Umwelt führt (Xu und Liu, 2015, Zhang und Xu, 2016). In den letzten Jahrzehnten war die offene Verbrennung die vorherrschende Methode zur Behandlung dieser Materialien, was zur Entstehung großer Mengen giftiger Gase und Feinstaubpartikel führte, die potenzielle Risiken für die Luft- und Bodenverschmutzung darstellen (Bagwan, 2024, Jabbour et al., 2023, Panda et al., 2021, Panda et al., 2023, Wang et al., 2017). Daher wird jetzt großer Wert darauf gelegt, diese Materialien nachhaltig zu behandeln, ohne die Umwelt zu beeinträchtigen. Darüber hinaus ist Elektroschrott eine potenzielle Quelle für eine breite Palette von Metallen, darunter unedle Metalle, Seltenerdmetalle (REM) und kritische Metalle (Panda et al., 2023). Ein nachhaltiges Recycling dieser Abfallstoffe würde nicht nur die Gefahr einer Umweltverschmutzung verringern, sondern auch dazu beitragen, die Metallwerte wieder herkömmlichen Anwendungen zuzuführen (Ellamparuthy et al., 2024)..

Obwohl Elektroschrott aus zahlreichen Bestandteilen besteht, gewinnt das Recycling von Leiterplatten (PCBs) aufgrund ihrer homogenen Eigenschaften, einfachen Struktur und höheren Konzentrationen hochreiner unedler Metalle und Edelmetalle an Bedeutung (Nithya et al., 2018). Es ist zu beachten, dass eine PCB, auch als Printed Wiring Board (PWB) bezeichnet, als Vermittler zwischen elektrischen Schaltungskomponenten fungiert; daher ist sie heutzutage ein integraler Bestandteil jedes elektrischen und elektronischen Geräts. Abb. 3 zeigt typische Bilder verschiedener PCBs, die in elektronischen Geräten verwendet werden (Ellamparuthy et al., 2024).

PCBs bestehen überwiegend aus verschiedenen Komponenten, darunter elektrische Elemente, Polymersubstrate, Lötmittel, Verbindungsmaterialien, Metallbeschichtungen und Lötmasken (Marques et al., 2013; Wang et al., 2017). Das Polymersubstrat in PCBs dient dazu, elektronische Komponenten zu stützen und die Kupferschaltkreise über mehrere Schichten zu isolieren. Dieses

Substrat enthält Materialien wie Flammenschutzmittel (FR), duroplastische Harze und Verstärkungselemente (Wang et al., 2017). Der Metallgehalt in PCBs findet sich hauptsächlich in elektronischen Komponenten, leitfähigen Kupferschichten und Lötverbindungen. Im Allgemeinen bestehen PCBs aus Metallen, Kunststoffen und Keramik; die Zusammensetzung dieser Materialien variiert jedoch stark je nach Typ, Art, Hersteller, Modell, Anwendung und Alter des Geräts (Mmereki et al., 2016). Beispielsweise bestehen PCBs von Mobiltelefonen zu etwa 40 % aus Metallen mit einer erheblichen Konzentration an unedlen Metallen (Fe, Al, Ni, Cu, Sn) und Edelmetallen (Ag, Au, Pt, Pd) (Fornalczyk et al., 2013; Kaya, 2016; Vakilchah und Mousavi, 2022). Die in PCB-Abfällen vorhandenen Elemente sind in Abb. 4 dargestellt. Die Masse der Leiterplatten hängt weitgehend von der Anwendung in elektrischen und elektronischen Geräten ab. Die komplexen physikalischen und chemischen Eigenschaften der PCB-Komponenten weisen aufgrund der Vielzahl an Anwendungen und Herstellungsverfahren viele Unterschiede auf (Goosey und Kellner, 2003). Darüber hinaus enthalten PCBs auch eine erhebliche Menge an giftigen Metallen wie Blei, Quecksilber, Arsen, Cadmium, Selen und Chrom, die schwere Auswirkungen auf das Ökosystem haben (Priya und Hait, 2018; Chakraborty et al., 2022).

Insbesondere Kupfer (Cu) macht einen erheblichen Anteil der Metalle in Leiterplatten aus, es macht etwa 10–20 % der Masse aus und dient als leitfähige Schicht (Li et al., 2018). Kupferfolien, die als selbstklebende, einseitige und doppelseitige Varianten kategorisiert werden, tragen zur Metallzusammensetzung bei. Kupferfolie in elektronischer Qualität weist eine Reinheit von 99,7 % und eine Dicke von 5 µm bis 105 µm auf. Weitere Metalle wie Zinn (Sn), Nickel (Ni), Gold (Au), Silber (Ag) und andere werden ebenfalls in Metallbeschichtungen verwendet. Normalerweise sind Zinn, Blei, Zink, Silber und Wismut in den leitfähigen Folien vorhanden (Marques et al., 2013; Mesquita et al., 2018). Darüber hinaus werden Aluminium und Kupfer auch in Kühlkörpern und Kondensatoren verwendet, während mit Gold beschichtete Germanium- und Ferronickel-Stifte in Transistoren und Finger-/Randverbindern verwendet werden. Das in PCBs integrierte Keramikmaterial umfasst Siliziumdioxid, Aluminiumdioxid, Alkali- und Erdalkalioxide, Titanate, Glimmer und andere (Ogunniyi et al., 2009). Siliziumdioxid fungiert als Isolator und dielektrisches Material in integrierten Schaltkreiskondensatoren. Aluminiumoxid, ein elektrischer Isolator, wird in integrierten Schaltkreisen verwendet und dient als Dielektrikum mit einer relativ großen Bandlücke, wodurch es sich zur Isolierung von Kondensatoren eignet. Tabelle 1 zeigt eine vergleichende Analyse der Elementzusammensetzung verschiedener unedler und Edelmetalle, die sowohl in PCBs als auch in natürlichen Erzen vorkommen. Bemerkenswerterweise sind die metallischen Bestandteile in weggeworfenen PCBs viel höher als in natürlich vorkommenden Erzen (Yousef et al., 2020). So liegt beispielsweise der Kupfergehalt in PCB-Abfällen zwischen 20 % und 30 %, was deutlich höher ist als die 0,5–3 %, die in natürlich vorkommenden Erzen zu finden sind. Ebenso liegt der Zinngehalt in PCB-Abfällen zwischen 3 % und 6 %, verglichen mit 0,2–0,8 % in natürlichen Erzen. Darüber hinaus beträgt der Gold- und Silbergehalt in PCB-Abfällen 0,05–1 %, was deutlich höher ist als die lediglich

0,0005 %, die in natürlich vorkommenden Erzen zu finden sind. Dieser Kontrast zeigt die zwingende Notwendigkeit, die in PCB-Abfällen enthaltenen Metallkomponenten zu recyceln, was wirtschaftliche und ökologische Vorteile bietet (Ellamparuthy et al., 2024).

Aus der obigen Diskussion geht hervor, dass PCBs als vielversprechende Quelle wertvoller Metalle gelten können, sofern sie einem geeigneten Verarbeitungsprozess unterzogen werden. Der Zweck dieses Artikels besteht darin, einen Überblick über die mechanischen Trennverfahren zu geben, die beim PCB-Recycling zur Rückgewinnung verschiedener metallischer Werte verwendet werden. Er untersucht verschiedene Technologien und ihre Wirksamkeit bei der Trennung metallischer Komponenten von nichtmetallischen Fraktionen. Insgesamt betont der Artikel die Bedeutung dieser Verfahren für die Gewinnung wertvoller Ressourcen aus Elektroschrott bei gleichzeitiger Minimierung der Umweltbelastung (Ellamparuthy et al., 2024).

## **2.4 Innovative Vorbehandlung vor der konventionellen Zerkleinerung**

Um die Nachteile herkömmlicher Zerkleinerungsverfahren zu überwinden, haben Forscher Vorbehandlungsverfahren entwickelt, um die Zerkleinerungseffizienz von WPCBs zu verbessern. In diesem Abschnitt werden vier Vorbehandlungsansätze beschrieben: kryogenes Mahlen, Thermoschock, gemeinsames Erhitzen und mikrowelleninduzierte Pyrolyse (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

Kryogene Zerkleinerung ist eine Technik, die verwendet wird, um die Größe von Materialien durch Zerkleinern oder Mahlen bei niedrigen Temperaturen zu reduzieren. Dieser Prozess ist besonders vorteilhaft für Materialien, die bei niedrigen Temperaturen spröder werden, da sie dadurch leichter in kleinere Partikel zerlegt werden können. Darüber hinaus verhindert oder minimiert diese Technik den Wärmestau, der sonst zu Materialabbau oder -schmelzen führen kann (Daborn & Derry, 1988). Studien von Suponik et al. (2021) und Franke et al. (2021) kamen zu dem Schluss, dass die Aussetzung von Materialien gegenüber kryogenen Temperaturen einen positiven Einfluss auf die Größe und Morphologie der Körner hat. Infolgedessen unterstützt die vorgeschlagene Methode die Extraktion von Metallen aus WPCBs. Beide Studien erwähnten auch, dass das gekühlte Material deutlich schneller gemahlen wurde, was zu einem höheren Grad der Metallfreisetzung führte. Trotz dieser Vorteile wird die wirtschaftliche Rentabilität des kryogenen Mahlens immer noch diskutiert, was die Notwendigkeit einer umfassenden wirtschaftlichen Analyse für die Anwendung im großen Maßstab unterstreicht (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

Jüngste Studien haben das Potenzial einer schnellen Kryobehandlung untersucht, um erhebliche innere Spannungen und Risse in der Matrix von Polymerverbundstoffen zu erzeugen, was das Recycling von WPCBs erleichtern könnte. Diese Technik beruht auf der thermischen Ausdehnungsfehlانpassung zwischen Polymerharzen und Glasverstärkungen oder metallischen Elementen in WPCBs und verbessert theoretisch die Recyclingfähigkeit, indem sie die Materialtrennung erleichtert (Yuan, Zhang & McKenna et al., 2007).

Yuan et al. (2007) widersprachen dieser Hypothese jedoch. Ihre Ergebnisse deuten darauf hin, dass die thermische Fehlanpassung zwischen den WPCB-Komponenten nicht ausreicht, um Spannungen zu erzeugen, die das Harz reißen oder die Schnittstelle ablösen können. Darüber hinaus wird die durch die Kryobehandlung induzierte thermische Spannung als unzureichend erachtet, um eine erhebliche Schwächung oder Mikrorisse in Materialien zu verursachen. Yuan et al. kamen folglich zu dem Schluss, dass die Kryobehandlung weder die Recyclingfähigkeit von PCBs verbessert noch zur Reduzierung der mit derzeitigen Recyclingverfahren verbundenen Energiekosten beiträgt (Yuan, Zhang & McKenna et al., 2007).

Die Thermoschockbehandlung hat sich als vielversprechender Ansatz erwiesen, um die Beschränkungen herkömmlicher Zerkleinerungstechniken für WPCBs zu überwinden (Li, Duan, Yu & Wang, 2010). Laut der Studie von Yan et al. (2020) konnte die Kombination von mechanischem Zerkleinern mit Wärmeverbehandlung die Zerkleinerungseffizienz von WPCBs verbessern. Die Studie zeigte, dass eine Erhöhung der Temperatur oder der Dauer der Wärmebehandlung die Zerkleinerungswirkung verbesserte. Wichtig ist, dass die Wärmeverbehandlung auch die Kupferanreicherung innerhalb eines bestimmten Partikelgrößenbereichs erleichtert. Insbesondere erhöhte sich innerhalb von nur 60 s Behandlung die Ausbeute an Kupfer im Größenbereich von 0,3 bis 1 mm um 9,74 %. Diese Kupferanreicherung ist wichtig, da sie die Wirtschaftlichkeit von Recyclingprozessen durch die erhöhte Rückgewinnung wertvoller Metalle steigern kann (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

Eine weitere Vorbehandlungsmethode zur Herbeiführung struktureller Schäden an WPCBs ist das Coheating-Quellverfahren. Durch Coheating von WPCBs mit einem organischen Lösungsmittel können die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien zu strukturellen Schäden führen. Das Harz in WPCBs, eine hochmolekulare organische Verbindung, reagiert mit dem Lösungsmittel. Während dieses Prozesses dringt das Lösungsmittel in die inneren Schichten der Platten ein, erweicht und dehnt diese aus. Diese Ausdehnung schwächt die Bindung zwischen den Schichten. Anschließend wird diese Behandlung mit einem Zerkleinerungsprozess kombiniert, um die Freisetzung metallischer und nichtmetallischer Komponenten aus der groben Fraktion der WPCBs zu erleichtern (Zhu, Chen & Wang et al., 2013)

In der Studie von Han et al. (2019) wurde die Zerkleinerungswirkung von WPCBs unter Verwendung einer Rotationsschere nach gleichzeitiger Erhitzung und Quellung mit Dimethylacetamid als organischem Lösungsmittel untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die gleichzeitige Erhitzung und Quellung von WPCBs zu signifikanten Veränderungen ihrer mechanischen Eigenschaften und ihrer Struktur führte. Die Biegefestigkeit nahm nach der Behandlung um 57 % ab, was zur Zerstörung der nichtmetallischen Grenzfläche und zu Rissen an den metallischen und nichtmetallischen Grenzflächen führte. Dieser Prozess erleichterte die Freisetzung von Metallen aus den WPCBs und ihre Anreicherung in der groben Fraktion, wodurch der Gehalt an Feinpartikeln im Vergleich zur

unbehandelten Probe um mehr als 8 % reduziert und so die nachfolgende Behandlung verbessert wurde (Han, Duan & Lu et al., 2019).

Obwohl es bereits eine beträchtliche Menge an Forschungsarbeiten zur Pyrolyse von WPCBs gibt, wurden in den meisten Studien extern beheizte Geräte wie thermogravimetrische Analysatoren, Drehrohröfen und Festbettreaktoren verwendet. Diese Methoden beinhalten eine Erwärmung durch externe Mechanismen wie Leitung, Konvektion und Strahlung. Im Gegensatz dazu ist die Mikrowellenerhitzung eine Form der internen und volumetrischen Erwärmung, die zu einer Selektivität gegenüber unterschiedlichen Materialien führt. Die mikrowelleninduzierte Pyrolyse von WPCBs kann aufgrund ihrer selektiven Natur energieeffizient durchgeführt werden (Long, Sun & Zhong et al., 2010; Sun, Wang, Ma & Dong, 2010).

In der Arbeit von Sun et al. (2021) wurden die Nebenprodukte der mikrowelleninduzierten Pyrolyse von WPCBs in einem Rotationsschredder grob zerkleinert. Die Studie zeigte, dass eine wirksame Befreiung der Metalle von den nichtmetallischen Komponenten durch Reduzierung der Steifheit der gewebten Glasfasern erreicht wurde, was zur Herstellung von haarigen Glasfasern führte. Durch das Zerkleinern der Pyrolyserückstände wurden über 99 % der Metalle von der Grundplatte freigesetzt. Der Großteil der Metalle und Nichtmetalle wurde in der Grobfraction ( $> 0,9$  mm) gefunden. Nichtmetalle, insbesondere spröder Koks, verteilten sich in der Feinfraktion ( $< 0,28$  mm), während Metalle und Glasfasern hauptsächlich in den Grobfractionen vorhanden waren. Dies lässt darauf schließen, dass nachfolgende Trennverfahren für die Behandlung grober Partikel geeignet sein sollten (Sun, Wang, Liu & Ma, 2011).

## **2.5 Hochspannungsimpuls und elektrodynamische Fragmentierung**

Vor kurzem hat sich eine Technik namens Hochspannungsimpulstechnik (HVEP) als effektive Methode zum Aufbrechen von Erzen und Betonmaterialien zur Rückgewinnung wertvoller Ressourcen erwiesen. Bei dieser Methode werden zum Zerkleinern Stoßwellen verwendet, die durch hohen Druck von über 103 MPa erzeugt werden. Im Vergleich zu herkömmlichen mechanischen Zerkleinerungsmethoden hat sich HVEP zum Zerkleinern verschiedener Materialien wie Kupfersulfiden, Ilmeniterzen und Chromaten als effizienter erwiesen. Dabei können mehr wertvolle Mineralien freigesetzt und gleichzeitig die Auswirkungen des Abriebs auf das Erz minimiert werden. Diese Erkenntnisse wurden in mehreren Studien dokumentiert, beispielsweise in denen von Andres (2010) und Wang et al. (2016).

Verbundwerkstoffe in WPCBs können elektrische und akustische Eigenschaftsunterschiede verursachen. Diese Unterschiede in der dielektrischen Permittivität erhöhen das elektrische Feld und erzeugen Entladungskanäle, die zu Stoßwellen mit lokalen Drücken von bis zu 10.000 bar führen. Stoßwellen konzentrieren Zugspannungen an Grenzflächen, was zu einer selektiven Fragmentierung von Materialien entlang der Grenzen, einer Schwächung von Materialien entlang der Partikelgrenzen oder einer Verringerung der Materialgröße ohne Verunreinigung führt. HVEP

bietet Vorteile wie die Freisetzung grober Elemente, Energieeinsparungen, die Rückgewinnung von Elementen in Originalgröße, die selektive Freisetzung wertvoller Metalle und eine effiziente Trennung von WPCB-Verbundwerkstoffen ohne die Notwendigkeit einer Feinzerkleinerung (Kaya, 2020)

Duan et al. (2018) haben eine Studie durchgeführt, bei der Hochspannungsimpulse zur Verarbeitung von WPCBs verwendet wurden, um metallische und nichtmetallische Materialien effizient und gleichzeitig kostengünstig freizusetzen. Aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften von Metallen und Nichtmetallen wirkt die HVEP-Energie hauptsächlich auf die Schnittstelle von Kupferfolie und GFC, wodurch diese beiden Komponenten mühelos freigesetzt werden. Die Ergebnisse zeigten, dass durch HVEP bei einem relativ groben Größenbereich ein höherer Metallfreisetzungsgrad erreicht wurde als durch herkömmliches mechanisches Zerkleinern. Die mit HVEP erzielten Ergebnisse hängen von den Betriebsparametern wie Spannungspegel und Impulszahl ab (Duan, Han & Zhao et al., 2018).

Eine weitere Technik, die elektrodynamische Fragmentierung (EDF), ist wirksam beim Aufbrechen von WPCBs und Freilegen von Kupferfolien zum Auslaugen. Durch die Erzeugung elektrischer Entladungen kann eine EDF Materialien selektiv fragmentieren, elektronische Komponenten entfernen, Strukturen öffnen und die Größe von Materialien reduzieren. Mit dieser Methode können Mineralien geschwächt und verschiedene Materialien recycelt werden, darunter WPCBs, Kohlenstofffasern und Bodenasche (Martino, Iseli & Gaydardzhiev et al., 2017). Die Ergebnisse der EDF werden von verschiedenen Betriebsparametern wie Spannung, Frequenz und Impulszahl beeinflusst. Im Vergleich zu herkömmlichen mechanischen Zerkleinerungsverfahren erzeugt die EDF weniger Feinmaterialien, wodurch die freigesetzten Materialien effizienter weiterverarbeitet werden können, insbesondere bei wertvollen elektronischen Geräten am Ende ihrer Lebensdauer. Die EDF-Technik umfasst drei Schritte: Entvölkerung, Delamination und vollständige Fragmentierung. Die Entvölkerung ist zum Entfernen elektronischer Komponenten erforderlich, gefolgt von der Delamination, die für das Recycling von WPCBs unerlässlich ist. (Hinweis: Der Vergleich des Energieverbrauchs zwischen EDF und herkömmlichen Zerkleinerungsverfahren wurde bereits unter „Energieverbrauch“ besprochen (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

## **2.6 Abrasives Wasserstrahlschneiden**

Eine weitere nicht traditionelle Zerkleinerungstechnik, die sich in letzter Zeit als vielversprechend erwiesen hat, ist das abrasive Wasserstrahlschneiden (AWJ). Die Strahlwolke der AWJ-Bearbeitung wird als „Schneidwerkzeug“ verwendet, um harte Materialien wie Keramik, Glas und Stein in kleinere Stücke zu zerlegen. Dies wird durch Hochgeschwindigkeitsmischungen aus Schleifmitteln und Wasser ohne zusätzliche chemische Substanzen erreicht. Darüber hinaus hat diese Methode anerkannte Vorteile wie hohe Effizienz und das Fehlen von Wärmeentwicklung (Schnakovszky, Herghelegiu, Radu & Cristea, 2014; Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).



Yang et al. (2021) führten eine Studie durch, in der verschiedene Elektroschrottmaterialien verschiedener Dicke und Härte einem AWJ-Schneiden unterzogen wurden. Ziel dieser Studie war es, die Fähigkeit des AWJ-Schneidens zu bewerten, Metallressourcen aus Elektroschrott zu zerkleinern und zurückzugewinnen. Die Ergebnisse zeigten, dass das Gewicht von Partikeln größer als 154 µm zunahm, während das von Partikeln kleiner als 154 µm aufgrund von abrasivem Verschleiß und der Entstehung von mikroskopisch kleinen Partikeln aus der CPU abnahm. Die Studie ergab, dass zerbrochene Produkte mit großen Partikelgrößen selten und meist komplexe Fraktionen waren, während Produkte mit kleinen Größen meist einkomponentige Substanzen waren, da die dünnen Schichten aus WPCB die Entstehung von Partikeln im Mikronbereich begünstigen. Die Studie zeigte auch, dass WPCB in einem einstufigen Prozess in Partikel im Mikronbereich zerkleinert werden können, wodurch eine hervorragende Freisetzung der Metalle aus den WPCB-Schichten ermöglicht wird, ohne dass zusätzliche Geräte zur Größenreduzierung und Staubsammlung erforderlich sind (Yang, Liu, Ye & Qian, 2021).

Der Mechanismus des AWJ-Schneidens umfasst einen flüssig-festen Zweiphasenfluss mit hoher Geschwindigkeit, bei dem Schleifpartikel mit Hochdruckwasser vermischt werden. Beim Zerkleinern der Oberflächenschicht führen Erosion und Aufprall der Schleifpartikel bei hoher Geschwindigkeit zu Materialabtrag. Beim Zerkleinern der inneren Schicht führten die unterschiedlichen Verformungen metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe in WPCBs beim Schleifstrahlschneiden zur Trennung von Metallen von Nichtmetallen (Abb. 16 ). Metallische und nichtmetallische Werkstoffe zeigen aufgrund ihrer unterschiedlichen Zugfestigkeiten und Elastizitätsmodule eine effektive Trennungsleistung. Das Entfernen von Komponenten bei großen Aufprallwinkeln ist für die Trennung von Metallen von Nichtmetallen in WPCBs effektiver ((Yang, Liu, Ye & Qian, 2021; Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

## **2.7 Recycling von geschredderten Leiterplatten (PCBs) mit Hilfe von Zwei-Phasen-Wellenförderern.**

Chahinez (2024). die Durchführbarkeit der elektrostatischen Trennung von Gemischen aus geschredderten Leiterplatten (PCB) in Verbindung mit der Röntgenfluoreszenzanalyse zu demonstrieren und gleichzeitig zu untersuchen, wie die Effizienz dieser Methode durch die Versorgungsspannung beeinflusst wird, sowohl in Bezug auf die Amplitude als auch die Art. Methoden: Die elektrostatische Trenntechnik wird mit Hilfe eines Zweiphasen-Förderers mit beweglicher Welle und einer Charakterisierungsanalyse mittels Röntgenfluoreszenz eingesetzt, um die Effizienz des untersuchten Prozesses zu rechtfertigen. Ergebnisse: Die Ergebnisse dieser Studie können praktische Auswirkungen auf die Verbesserung des Recyclingprozesses von Elektronikschrott, insbesondere von Leiterplatten (PCBs), haben. Durch die Optimierung der Hochspannung und das Verständnis ihrer Auswirkungen auf den elektrostatischen Trennungsprozess kann es möglich sein, die Effizienz und Effektivität des Recyclings von

Wertstoffen aus Elektronikschrott zu erhöhen und gleichzeitig die Umweltbelastung zu reduzieren. Schlussfolgerung: Die XRF-Analyse der Proben zeigt ihre unterschiedlichen Zusammensetzungen. Die beobachteten Unterschiede sind noch ausgeprägter, wenn man den Einfluss der angelegten Spannungen auf den elektrostatischen Trennungsprozess berücksichtigt (Chahinez, 2024).

## **2.8. Technologieentwicklung für die Trennung von Mehrschichtverbünden**

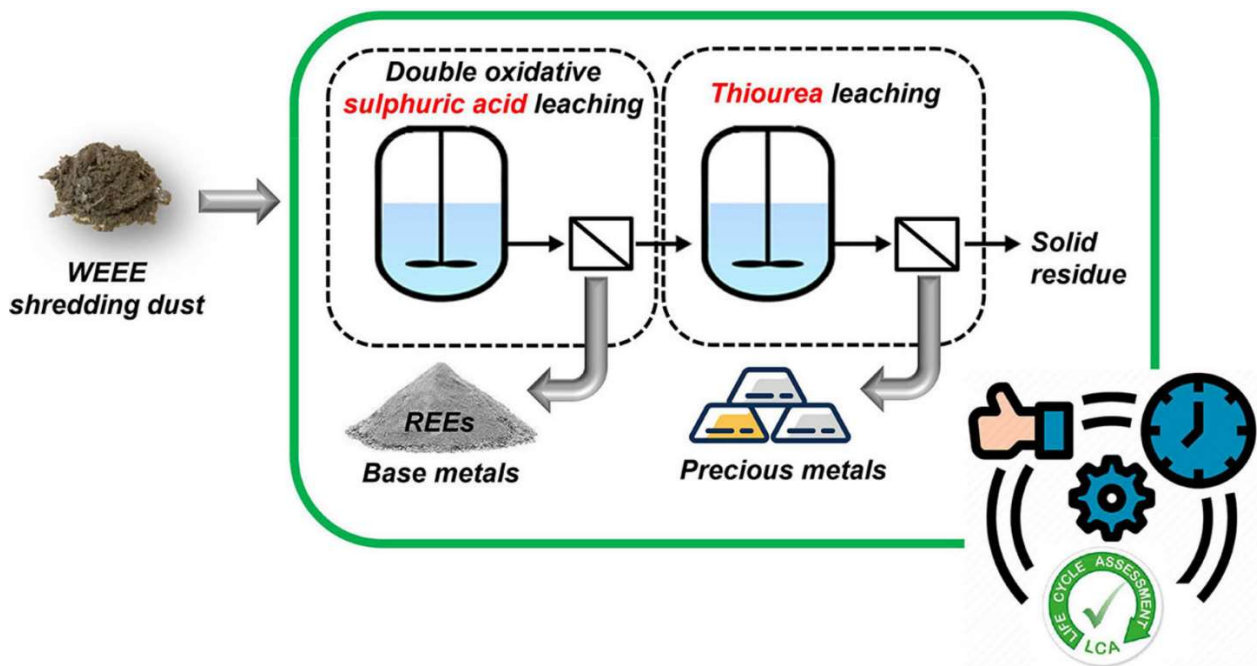
Leiterplattenabfälle (WPCBs) sind integrale Bestandteile praktisch aller elektrischen und elektronischen Geräte und bilden das strukturelle Rückgrat der Elektronikindustrie (Miliauskas & Denafas, 2024). Sie sind das strukturelle Rückgrat der Elektronikindustrie. Unterteilt in einseitige, doppelseitige, mehrlagige, starre und flexible Leiterplatten, bestehen WPCBs aus verschiedenen elektronischen Komponenten wie Halbleitern, Transistoren und Kondensatoren, was ihr Recycling aufgrund der unterschiedlichen Materialzusammensetzung erschwert. Etwa 40 % der Leiterplattenmasse besteht aus Metall, 30 % aus Kunststoff und 30 % aus organischem Material, wobei die Metalle überwiegend aus Kupfer bestehen. Der Recyclingprozess umfasst mehrere Stufen, einschließlich Zerkleinerung und Trennung, um die wertvollen Metalle und elektronischen Komponenten zu extrahieren. Die Zerkleinerung mit Hilfe von Technologien wie Hammermühlen ist entscheidend für eine effektive Metallrückgewinnung. Für die effiziente Trennung von elektronischen Bauteilen wurden fortschrittliche Methoden entwickelt, wie z. B. automatische Entnahmesysteme auf der Basis von Infrarotheizungen, die eine minimale Umweltbelastung gewährleisten. Mechanische und physikalische Aufbereitungstechniken konzentrieren sich auf die Gewinnung wertvoller Metalle wie Gold, Silber, Palladium und Kupfer, wobei auch das Potenzial der nichtmetallischen Fraktion erkannt wird. Die chemische Aufbereitung mit anorganischen Säuren wie Salpeter- und Schwefelsäure sowie oxidativen Auslaugungsmitteln hat sich für die Metallrückgewinnung bewährt. Innovative Methoden, einschließlich der Verwendung von Königswasser für die Goldlaugung, haben hohe Rückgewinnungsraten gezeigt. Dieser umfassende Ansatz für das WPCB-Recycling unterstreicht (Miliauskas & Denafas, 2024).

## **2.9. Die hydrometallurgische Rückgewinnung kritischer und wertvoller Elemente aus dem Schredderstaub von Elektro- und Elektronikaltgeräten**

### **Prozesseffektivität aus einer Lebenszyklusperspektive**

Kürzlich wurde ein zweistufiger hydrometallurgischer Prozess zur Behandlung des bei der mechanischen Verarbeitung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten entstehenden Staubs erfolgreich untersucht. Die in dieser Studie ausgewählten besten Betriebsbedingungen wurden verwendet, um die Rückgewinnung von Edelmetallen und kritischen Elementen weiter zu untersuchen. Dabei wurden Extraktionsausbeuten von jeweils etwa 77,7 % und 53,1 % erreicht; unedle Metalle (z. B. Aluminium, Zink, Kupfer usw.) wurden ebenfalls bis zu 96 % aus dem Staub herausgelöst. Ein Lebenszyklusansatz wurde ebenfalls angewendet, um die potenziellen Umweltauswirkungen des

vorgeschlagenen Prozesses im Hinblick auf den Herstellungsprozess des Neumaterials vorläufig zu bewerten und zu vergleichen. Die Analyse konzentrierte sich auf Standardumweltindikatoren (z. B. Treibhauspotenzial, Versauerung usw.), Humantoxizität und Ökotoxizität sowie fünf verschiedene Charakterisierungsmodelle für die abiotische Erschöpfung von Ressourcen. Vier Szenarien, die sich in Bezug auf die Zuteilungskriterien (Masse/Wirtschaft) und die mögliche Rückgewinnung von Metallen zusammen mit Seltenen Erden unterschieden, wurden verglichen. Unter den zurückgewonnenen Produkten wurden die größten potenziellen Vorteile bei Seltenerdelementen festgestellt, und zwar in dem Szenario, in dem die vollständige Rückgewinnung von unedlen und Edelmetallen und eine wirtschaftliche Allokation berücksichtigt wurden. Die Auswirkungen auf den abiotischen Abbau und die Toxizität machen die größten Vorteile der Materialrückgewinnung aus. Die Rückgewinnung von Schwefelsäure würde jedoch auch eine weitere Reduzierung anderer Auswirkungen ermöglichen und die potenzielle Wettbewerbsfähigkeit der Rückgewinnung von Seltenerdelementen gegenüber der Herstellung von Neumaterialien stärken.



Elektro- und Elektronik-Altgeräte sind in der Tat eine relevante urbane Mine, die verschiedene Altgeräte umfasst, was sie zu einer geeigneten Sekundärquelle für eine Vielzahl von Materialien macht (Shittu et al., 2021), insbesondere für Metalle (Sun et al., 2015). Metalle machen den größten Anteil der Elektro- und Elektronik-Altgeräte aus, sowohl hinsichtlich der Masse (Oguchi et al., 2011; Widmer et al., 2005) als auch des Wertes, und anders als die nichtmetallischen Fraktionen, die beim Recycling einige Herausforderungen mit sich bringen (Wang und Xu, 2014), stehen sie im Mittelpunkt der meisten Rückgewinnungsprogramme. Diese basieren in der Regel auf Vorverarbeitungsanlagen, die meist eine mechanische Trennung der Rohstoffe durchführen, die dann in gezielte Recyclingprozesse geleitet werden. Die Vorverarbeitung spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Qualität der Rezyklate, wobei die mechanische Sortierung für die

weitgehend vorhandenen Metalle wirksam ist (Ueberschaar et al., 2017). Dazu gehören Aluminium, Kupfer und in geringerem Maße Gold, die die Zielmetalle der pyrometallurgischen Prozesse sind, aus denen die ausgewählten Metallströme gewonnen werden. Bei der Rückgewinnung anderer Edelmetalle und Seltenerdelemente (REEs) hingegen besteht noch großer Verbesserungsbedarf. Genauer gesagt behaupten mehrere Studien, dass die Zerkleinerungs- und Siebschritte für den Hauptverlust eines großen Teils der Edelmetalle und REEs verantwortlich sind, die sich im Staub konzentrieren, der überwiegend bei diesen Vorgängen entsteht (Bachér und Kaartinen, 2017; Chancerel und Rotter, 2009; Marra et al., 2018a) und normalerweise auf Mülldeponien landen. Dieser Verlust wertvoller Elemente ist bei REEs besonders gravierend, da diese „Vitamine der modernen Industrie“ (Balaram, 2019) in mehreren strategisch wichtigen Sektoren wie erneuerbaren Energien und Digitaltechnologie zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten haben. Ihre Verfügbarkeit ist daher von entscheidender Bedeutung, um sowohl den ökologischen Wandel als auch die mit dem Green Deal auf europäischer Ebene angestrebten digitalen Innovationen voranzutreiben und die Unabhängigkeit der strategischen Industriebereiche von Importen sicherzustellen.

In diesem Zusammenhang haben aktuelle Studien die Wirksamkeit der Materialrückgewinnung in verschiedenen industriellen Vorverarbeitungsanlagen für Elektro- und Elektronik-Altgeräte untersucht. Tutton et al. (2022) zeigten, dass ein Vorverarbeitungssystem, das auf der manuellen Sortierung großer Mengen elektronischer Geräte beruht, sowohl ökologische als auch finanzielle Vorteile bietet, da die Schredderphase die Qualität der Rezyklate mindert. Obwohl die manuelle Isolierung elektronischer Komponenten, die kritische Rohstoffe enthalten, zu geringeren Verlusten durch Schreddern führt, ist ein solcher Vorgang zeit- und arbeitsintensiv und daher unwirtschaftlich (Charles et al., 2020). Die Automatisierung der Demontage kann die Trennung der wertvollen Elektro- und Elektronik-Altgeräte zur weiteren Veredelung ermöglichen, aber es können alternative Rückgewinnungsverfahren entwickelt werden, um auf der Grundlage ihrer detaillierten Charakterisierung gezielt bestimmte Elemente in den Vorverarbeitungsergebnissen zu gewinnen (Charles et al., 2020).

Elektro- und Elektronik-Schredderstaub kann bis zu 8 % des Gewichts des eingehenden Stroms zur mechanischen Behandlungslinie ausmachen (Bachér et al., 2015; Marra et al., 2018a), und frühere Studien haben gezeigt, dass die Konzentration an Seltenen Erden und Edelmetallen in diesem Strom um eine Größenordnung höher sein kann als die in den eingehenden Elektro- und Elektronik-Altgeräten (Marra et al., 2018a). In dieser Hinsicht birgt Elektro- und Elektronik-Schredderstaub ein großes Potenzial für die Rückgewinnung von Seltenen Erden und anderen wertvollen Metallen, wird jedoch derzeit als Ausgangsmaterial nicht ausreichend genutzt. Nur wenige Versuche haben sich mit der Auslaugung dieser Elemente mittels bio- und hydrometallurgischer Techniken befasst. Es wurde ein zweistufiger Biolaugungsprozess aus dem Schredderstaub von Elektro- und Elektronik-Altgeräten vorgeschlagen, bei dem *Acidithiobacillus thiooxidans* zum Herauslösen der unedlen Metalle und seltenen Erden und *Pseudomonas putida* zum Freilegen der Edelmetalle eingesetzt

wird: Die unedlen Metalle wurden in 8 Tagen fast vollständig extrahiert, darunter auch hohe Prozentsätze (80 – 99 %) der seltenen Erden, wohingegen nach 3 Stunden lediglich 48 % Gold gewonnen wurden (Marra et al., 2018b). Eine hohe Extraktionseffizienz wurde auch durch die Anwendung eines zweistufigen hydrometallurgischen Prozesses unter Verwendung von Schwefelsäure und Thioharnstoff erzielt. In diesem Fall ermöglichten 6 Stunden unter optimalen Bedingungen eine hohe Solubilisierung der unedlen Metalle (60 – 100 %) und seltenen Erden (50 – 92 %) aus dem Schredderstaub von Elektro- und Elektronik-Altgeräten sowie die Extraktion von 53 % Gold innerhalb der nächsten Stunde (Marra et al., 2019).

Obwohl der bio-hydrometallurgische Ansatz aufgrund der geringen Umweltauswirkungen und der Möglichkeit, die Prozesskosten durch die Verwendung von Reagenzien biologischen Ursprungs zu senken, vielversprechend ist, können die verlängerte Auslaugungszeit sowie die potenzielle Toxizität einiger WEEE-Komponenten gegenüber dem beteiligten mikrobiellen Stamm die Skalierung behindern (Marra et al., 2018b). Umgekehrt scheint die Anwendung neuartiger hydrometallurgischer Prozesse in größerem Maßstab die Extraktion strategischer Zielelemente zu erleichtern. Bei der Bewertung der Umweltauswirkungen dieser Recyclingprozesse – und allgemein von Strategien der Kreislaufwirtschaft – ist es von grundlegender Bedeutung sicherzustellen, dass die Anwendung dieser Prinzipien die negativen ökologischen und sozialen Auswirkungen von Produkten entlang des Lebenszyklus verringert. Aus dieser Perspektive ist das Schließen von Kreisläufen nicht immer die beste Option, und Recyclingprozesse haben potenzielle Auswirkungen, die minimiert werden müssen (Del Borghi et al., 2009). Um die Auswirkungen der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft zu bewerten, ist die Anwendung einer Methode zur Lebenszyklusanalyse (LCA) daher äußerst nützlich (Harris et al., 2021). In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Ökobilanzstudien für verschiedene Verfahren zur Rückgewinnung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten durchgeführt und nützliche Hinweise bereitgestellt, um entweder die kritischsten Schritte innovativer Prozesse zu identifizieren oder die Auswahl der nachhaltigeren Lösungen anzugehen. Eine Ökobilanz wurde durchgeführt, um die Umweltauswirkungen einer Pilotanlage zu untersuchen, die für die hydrometallurgische Rückgewinnung von Kupfer, Silber und Gold aus kleinen Elektro- und Elektronik-Altgeräten durch eine zweistufige Laugung in Salpetersäure und Königswasser, gefolgt von einer galvanischen Abscheidung, konzipiert wurde. Die Autoren stellten fest, dass die Salpetersäurelaugung am meisten zu den Auswirkungen des Prozesses beitrug, gefolgt von der Adsorption, die durch eine Verlängerung der Sorptionslebensdauer verbessert werden könnte (Iannicelli-Zubiani et al., 2017). Ebenso zeigte die Ökobilanz einer Prototypanlage, die Seltene Erden, Kupfer, Gold und Silber aus Leuchtstofflampen, Kathodenstrahlröhren, Lithium-Ionen-Akkumulatoren und PCBs durch ein hydrometallurgisches Verfahren extrahierte, dass die höchste Umweltbelastung mit dem Schritt der Metallerkennung verbunden war (Rocchetti et al., 2013). Kürzlich untersuchten Karal et al. (2021) die Machbarkeit und Umweltverträglichkeit des Recyclings von Neodym (Nd) anhand eines Ökobilanzszenarios mit Schwerpunkt auf der Produktion von

Neodym-Eisen-Bor-Magneten (Nd-Fe-B). Der untersuchte Nd-Rückgewinnungsprozess basierte auf einer Vorbehandlung, gefolgt von einer chemischen Laugung mit 2 M Schwefelsäure bei 27 °C für 15 Minuten und Nd-Metallfällung. Die Ergebnisse zeigten, dass die Produktion von Magneten aus zurückgewonnenem Nd besser ablief als die Produktion von Neumagneten. Das hochskalierte Nd-Metallrückgewinnungssystem reduzierte die Umweltauswirkungen des Nd-Fe-B-Magnetproduktionssystems um bis zu 65 %. Dieses Ergebnis trat für acht der elf Umweltauswirkungskategorien auf und bestätigte die Bedeutung des Recyclings von Elektro- und Elektronik-Altgeräten, um den Industriesektor zu versorgen und die Erschöpfung der natürlichen Ressourcen zu reduzieren.

Nach bestem Wissen des Autors hat sich keine der wenigen Studien zum Recycling von Schredderstaub aus der Elektro- und Elektronik-Altgeräte-Verarbeitung mit der Umweltverträglichkeitsprüfung der vorgeschlagenen Lösungen befasst. Dies ist jedoch von grundlegender Bedeutung, um die Skalierung eines neuartigen Prozesses voranzutreiben, der die potenzielle Rückgewinnung eines unkonventionellen Ausgangsmaterials wie des Staubs aus der mechanischen Verarbeitung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten erschließen könnte. Daher wurden in dieser Studie die besten Betriebsbedingungen des von Marra et al. (2019) vorgeschlagenen zweistufigen hydrometallurgischen Prozesses weiter untersucht, um Schredderstaub aus der Elektro- und Elektronik-Altgeräte-Verarbeitung unterschiedlicher Herkunft zu behandeln und so frühere Ergebnisse zu bestätigen. Außerdem wurde ein Modell desselben Prozesses auf Grundlage der Ökobilanzmethode entwickelt, um die potenziellen Umweltauswirkungen des vorgeschlagenen hydrometallurgischen Recyclingprozesses im Hinblick auf den Herstellungsprozess des Neumaterials vorläufig zu bewerten und zu vergleichen und seine potenzielle Skalierung zu erörtern.

## **2.10 Mechanochemische Aktivierung zur besseren Entfernung von Grenzflächenverunreinigungen: Aktuelle Entwicklungen und gängige Techniken**

Grenzflächenprozesse, einschließlich Adsorption und Katalyse, spielen eine entscheidende Rolle bei der Entfernung von Umweltschadstoffen (He, Di, Gao & Fei, 2020). Die mechanochemische Aktivierung (MCA) erweist sich als wettbewerbsfähige Methode zur Verbesserung der Leistung von Adsorbentien und Katalysatoren. Die Entwicklung und Anwendung der MCA in den letzten Jahrzehnten werden dabei systematisch untersucht, wobei insbesondere ihr Beitrag zur Modulation von Grenzflächenprozessen hervorgehoben wird. Zwei typische Apparaturen für die MCA sind die Kugelmühle (BaM) und die Perlenmühle (BeM). Im Vergleich zur BaM kann die BeM eine viel höhere MCA-Intensität erzielen, da sie Feststoffpartikel auf nahezu 100 nm pulverisieren kann. Da die MCA-Intensität auf den Adsorbentien und Katalysatoren direkt für die anschließende Schadstoffentfernung verantwortlich ist, werden quantitative und qualitative Bestimmungsmethoden

für eine gültige MCA-Intensität eingeführt. Die MCA verbessert sowohl die Adsorptionskinetik als auch die Kapazität von pulverisierter Aktivkohle durch Vergrößerung der spezifischen Oberfläche. Der Kohlenstoffoxidation sollte zusätzliche Aufmerksamkeit gewidmet werden, begünstigt jedoch möglicherweise die Adsorption von Schwermetallen. MCA verbessert die Katalysatorleistung, indem es reichlich funktionelle Gruppen an der Oberfläche bereitstellt und die freie Energie in der oberflächennahen Region erhöht.

Die mechanochemische Aktivierung (MCA) wurde in den vergangenen Jahrzehnten umfassend untersucht und erweist sich als zukunftssträchtige Methode zur Verbesserung der Grenzflächenprozesse aktivierter Materialien. Nach der allgemein anerkannten Definition von Heinicke (1986) ist die Mechanochemie ein Zweig der Chemie, der sich mit der chemischen und physikochemischen Umwandlung von Substanzen in allen Aggregatzuständen durch mechanische Energiezufuhr befasst. Während der MCA finden verschiedene Prozesse statt, darunter die Zerkleinerung von Partikeln auf kleinere Größen, die Entstehung neuer Oberflächen und Phasen sowie Phasenumwandlungen (Tan und Li, 2015, Balaž et al., 2005). In diesem Bericht konzentrieren wir uns auf MCA, die bei der Verarbeitung von Feststoffen zur Entfernung von Umweltschadstoffen verwendet wird. Die vorherrschenden mit MCA hergestellten Materialien sind Adsorbentien, insbesondere pulverförmige Aktivkohle (PAC) und Verbundkatalysatoren. (He, Di, Gao & Fei, 2020). Adsorption und Katalyse sind zwei wichtige heterogene und grenzflächenbasierte Verfahren zur Entfernung von Schadstoffen. Beachten Sie, dass wir die Begriffe „heterogen“ und „grenzflächenbasiert“ im Kontext dieses Dokuments synonym verwenden, obwohl wir anerkennen, dass sie per Definition unterschiedlich sind. Ein tiefgreifendes Verständnis der mikroskopischen Prozesse inspiriert zu entsprechenden Maßnahmen, um Adsorbentien und Katalysatoren mit den gewünschten Eigenschaften zu modifizieren. Wie in Abb. 1 dargestellt, sind heterogene Verfahren vorteilhaft und werden überwiegend bei der Wasseraufbereitung eingesetzt. Im Gegensatz dazu ist die homogene Katalyse effektiv, aber die gelösten Katalysatoren sind potenzielle Schadstoffe und kaum wiederverwendbar. Es wurde bestätigt, dass Grenzflächenprozesse an den Flüssigkeits-Feststoff-Grenzflächen eine unverzichtbare Rolle bei der Entfernung feuerfester organischer Stoffe (Yu et al., 2017, Di et al., 2019, Yan et al., 2017) und giftiger Schwermetalle (Elwakeel et al., 2018, He et al., 2016, Tang et al., 2017) spielen. Die Adsorptionskapazität und -kinetik von Adsorbentien sowie die katalytische Aktivität und das Potenzial von Katalysatoren hängen stark von den physikochemischen Eigenschaften der Oberfläche ab (Yan et al., 2017, He et al., 2016, Chen et al., 2018).

Eine feste Oberfläche nimmt durch einfache Adsorption an Grenzflächenreaktionen teil (Chen et al., 2018, Mandal et al., 2017). Aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche fördert die ausgezeichnete Adsorptionskapazität die breite Anwendung von PAC bei der Wasseraufbereitung (Sotelo et al., 2014, Machado et al., 2011). Oberflächenfunktionsgruppen sind entscheidend für den katalytischen Abbau von Schadstoffen (Di et al., 2019, He et al., 2017b, Hassani et al., 2018a, Hassani et al.,

2018b). Die Häufigkeit der Funktionsgruppen und -stellen ist für die katalytische Leistung entscheidend, und Redoxreaktionen sind daran beteiligt (He et al., 2017b, Lei et al., 2018).

Die fördernde Rolle von MCA gegenüber den Grenzflächenprozessen zum Abbau von Schadstoffen kann auf zwei Arten zusammengefasst werden: Modulation der Oberflächeneigenschaften und Erhöhung der freien Energie im oberflächennahen Bereich. Aufgrund der endothermen Eigenschaft erfolgt der Abbau von Schadstoffen bevorzugt an der Oberfläche mit höherer freier Energie (Gao et al., 2019, Zhang et al., 2016a, Zhang et al., 2016b). MCA kann die Häufigkeit funktioneller Gruppen erhöhen, indem es Gruppen innerhalb des Kristalls freilegt und die gewünschte Phasenumwandlung einleitet. Die für die chemische Reaktion benötigte Aktivierungsenergie wird normalerweise durch externe Wärme, Licht oder elektrisches Potenzial bereitgestellt, während mechanische Kraft ein alternativer, aber grundlegend anderer Weg ist (Šapelák et al., 2013).

Während eines MCA-Prozesses führt die kontinuierliche Zufuhr mechanischer Kraft zu einer Gesamttransformation, die vereinfacht in zwei Phasen unterteilt wird (Balaž et al., 2013). Die erste Phase umfasst die Zunahme der inneren und Oberflächenenergie, die Zunahme der Oberfläche und die Abnahme der festen Kohärenzenergie. Die zweite Phase besteht hauptsächlich aus Entspannung, Adsorption und Rekristallisation, die während und nach der Aktivierungsphase stattfinden. Für ein bestimmtes Partikel ist seine gesamte freie Energie die Summe der freien Volumen- und Oberflächenenergie (He, Di, Gao & Fei, 2020):

MCA erhöht die BET-spezifische Oberfläche (Bujnáková et al., 2013) und das Porenvolumen (Hassani et al., 2018a, Hassani et al., 2018b). Feste Partikel können schließlich auf nahezu Nanometergröße zerkleinert werden (Pan et al., 2017a). Mit abnehmender Partikelgröße steigt der Prozentsatz freiliegender Atome auf der Oberfläche, was zu einer Vergrößerung der G- Oberfläche im Verhältnis zur G -Masse führt (Zhang et al., 2010a, Mudunkotuwa und Grassian, 2011). Gleichzeitig zerstört kontinuierliche mechanische Energiezufuhr die ursprüngliche Kristallstruktur und erzeugt verschiedene Arten von Strukturdefekten wie Versetzungen und Verzerrungen, die weiter zu einer größeren G- Oberfläche beitragen (Mudunkotuwa und Grassian, 2011). Mit anderen Worten: Unter den kombinierten Auswirkungen von Reibung, Kollision, Aufprall, Scherung und anderen mechanischen Reaktionen wird die mechanische Energie teilweise in Entropie und innere Energie der festen Struktur umgewandelt, insbesondere in der oberflächennahen Region (Bujnáková et al., 2013). Darüber hinaus tritt unter bestimmten Umständen eine Phasenumwandlung auf, d. h. die Struktur oder Zusammensetzung weicht vom Original ab. Die Vergrößerung der Oberfläche (Ando et al., 2010), die Entstehung struktureller Defekte (Wang et al., 2012) und die Einleitung einer Phasenumwandlung (Shi et al., 2018) gehören zu den wirksamen Strategien zur Verbesserung des Grenzflächenprozesses zur Schadstoffentfernung (He, Di, Gao & Fei, 2020).



### **3. Ein innovatives magnetisches Dichtentrenungsverfahren zum Sortieren körniger Feststoffe**

Angeregt durch das PEACOC-Projekt zur Metallrückgewinnung aus Feststoffen wurde ein innovatives Verfahren zur magnetischen Dichtentrenung (MDS) zur Sortierung von Feststoffen entwickelt. Es hat wesentliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Schwerkrafttrennungstechnologien und dem zuvor industrialisierten MDS-Verfahren. Das neue MDS-Verfahren verwendet einen geneigten planaren Magneten und ein horizontales Becken mit einer statischen magnetischen Flüssigkeit als Trennmedium. Ein Partikelgleitphänomen wurde als Merkmal identifiziert, das die Trennung unterstützen könnte. Es wurden Experimente durchgeführt, um die Rolle der MDS bei der Konzentration wertvoller Metalle in geschredderten PCBAs und der Reduzierung metallischer Verunreinigungen in Kunststofffraktionen geschredderter Drähte zu demonstrieren. Eine Pilotanlage wird vorgestellt, um das Design zur Erzielung einer kontinuierlichen Produktion und zur Reduzierung des Ferrofluidverbrauchs zu demonstrieren.

### **Eine Fallstudie zum Recycling von Leiterplatten mittels Desintegratortechnologie (2024)**

Die ständige und immer schnellere Anhäufung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) stellt eine Bedrohung für die Umwelt und die Menschen dar. Andererseits sind die WEEE und insbesondere ihre Komponenten, die Leiterplattenabfälle (WPCBs), reich an Edelmetallen (PMs) und unedlen Metallen (BMs), und zwar mehr als zehnmal so viel wie in natürlichen Erzen. Diese Möglichkeit hat die Mineralien verarbeitende Industrie (z. B. metallurgische Unternehmen) bereits dazu bewegt, das Problem des WEEE-Recyclings zu lösen. Analog zum Neulandbergbau stellen die derzeit mehr oder weniger wertlosen Teile der WPCBs jedoch auch eine Gesundheitsgefahr dar, da sie giftige Schadstoffe enthalten. Der Schlüssel zur effizienten Metallrückgewinnung aus WPCBs sind selektive Prozesse zur Fragmentierung und Trennung, die sowohl für Metalle als auch für Nichtmetalle präzise sind. Die Fragmentierung ist eine Voraussetzung für eine präzise Trennung. Bei der Verarbeitung von WPCBs wird das Mahlverfahren im geschlossenen Kreislauf (Größenreduzierung) bevorzugt, und eine vielversprechende Technologie für die Durchführung dieses Verfahrens ist das Hochintensitäts-Prallmahlen (HIIM). In diesem Artikel wird die HIIM-Technologie (Desintegrator) mit allgemein bekannten Technologien zur selektiven Größenreduzierung von WPCB verglichen. Die HIIM-Technologie zeigt, dass es möglich ist, den Größenreduzierungsprozess an verschiedene Materialien anzupassen und die unter Laborbedingungen erzielten anfänglichen Ergebnisse zu reproduzieren.

### **4. Ein hochproduktiver Bioprozess zur Gewinnung von metallischem Kupfer aus Leiterplatten (PCBs)**

Iglesias-González et al., (2024) Ein innovativer Ansatz zur Gewinnung von Kupfer (Cu) aus Leiterplatten (PCBs) wird derzeit durch die Erprobung eines effizienten kontinuierlichen

biohydrometallurgischen Prozesses untersucht. Dieser Prozess basiert auf einem kreisförmigen, mehrstufigen Ansatz, der darauf abzielt, den Verbrauch von Reagenzien auf ein Minimum zu reduzieren und gleichzeitig maximale Effizienz zu gewährleisten.

Eine der wesentlichen Erkenntnisse des Prozesses ist, dass in der Biooxidationsphase keine Hemmungen festgestellt wurden, was auf eine stabile und nachhaltige Umsetzung hindeutet. Darüber hinaus zeigte das Stadium der Eisenlaugung eine bemerkenswerte Produktivität bei der Kupfergewinnung, was diesen Prozess zu einer vielversprechenden Option für das Recycling wertvoller Metalle aus Elektroschrott macht.

Durch diesen Ansatz könnten nicht nur wertvolle Ressourcen zurückgewonnen, sondern auch die ökologischen Auswirkungen des Recyclings erheblich reduziert werden, indem ein umweltschonender und ressourceneffizienter Kreislauf etabliert wird.

PCB sind ein metallreicher Rückstand, unter dem Kupfer aufgrund seines Hauptgehalts hervorsticht, der viel höher ist als der in natürlichen Lagerstätten, sodass es eine potenzielle Sekundärressource darstellt. Es wurden viele Versuche unternommen, Kupfer durch Biohydrometallurgie zu gewinnen, da dies ein umweltfreundlicher Weg ist. Einer der Hauptnachteile ist jedoch die geringe Produktivität. Es wird ein globaler Prozess zur Gewinnung von Kupferkathoden aus PCBs vorgeschlagen, der auf Zirkularität basiert. Zunächst werden PCBs aus alten Mobiltelefonen auf Größen zwischen 800 und 2000  $\mu\text{m}$  geschreddert. Aus diesen Stücken wird in einem kontinuierlichen Rührkesselreaktor (CSTR) bei hoher Eisenkonzentration und einer moderaten Temperatur von 60 °C Kupfer herausgelöst, wobei eine Lösungsrate von über 1 g/L·h und eine Ausbeute von 99 % erreicht wird. Die Lösung, die den CSTR mit Konzentrationen von bis zu 10 g/L Cu verlässt, wird zur Regeneration von Fe(III) durch einen Hochleistungsbioreaktor geleitet. Es wurde eine Biooxidationsrate von 1,3 g/L·h erreicht und keine Hemmung beobachtet.

Gleichzeitig wird Kupfer im metallischen Zustand durch Lösungsmittlextraktion und elektrolytische Gewinnung zurückgewonnen, wobei Kreisläufe zu einem rentableren und nachhaltigeren globalen Prozess werden.

Beim PCB-Recycling werden in der Regel die verschiedenen Komponenten der Platine zerkleinert und getrennt, darunter die Metalle und die nichtmetallischen Materialien wie Kunststoffe und Keramik. Die Metalle können dann durch verschiedene Verfahren wie Schmelzen, Galvanisieren oder chemisches Auslaugen extrahiert werden (Liu et al., 2021). Das Recycling von PCBs hilft nicht nur dabei, wertvolle Metalle zurückzugewinnen, sondern reduziert auch die Umweltbelastung durch Elektroschrott. Wenn PCBs nicht ordnungsgemäß entsorgt werden, können sie giftige Chemikalien in die Umwelt freisetzen, darunter Schwermetalle und Flammschutzmittel, die die menschliche Gesundheit und die Umwelt schädigen können (Wang et al., 2020).

Die Rückgewinnung von Metallen aus PCBs ist mit mehreren Herausforderungen verbunden. PCBs sind komplexe und heterogene Materialien, und die Rückgewinnung von Metallen erfordert die Trennung verschiedener Komponenten wie Metalle, Kunststoffe und Keramiken (Yamane et al.,

2011). Dieser Trennungsprozess kann schwierig und kostspielig sein und aufgrund der Anwesenheit gefährlicher Substanzen Gesundheits- und Umweltrisiken bergen (Palanisamy und Subburaj, 2023). Darüber hinaus können die für die Rückgewinnung von Metallen aus PCBs erforderlichen Geräte und Technologien teuer in der Anschaffung und im Betrieb sein, was den Prozess in einigen Fällen wirtschaftlich undurchführbar macht (Moyo et al., 2020). Darüber hinaus haben die Heterogenität und die Vielfalt der Zusammensetzung von PCBs wichtige Auswirkungen auf deren Recycling und Entsorgung. Die Heterogenität ergibt sich aus den unterschiedlichen Materialien, aus denen sie bestehen, sowie aus den unterschiedlichen Herstellungsprozessen. Beispielsweise können sich PCBs in ihrer Anzahl von Schichten und den in jeder Schicht verwendeten Materialarten unterscheiden, abgesehen von den verschiedenen Arten der verwendeten elektronischen Komponenten wie Widerständen, Kondensatoren und Dioden (Cui und Forssberg, 2003). Traditionell werden Pyrometallurgie und Hydrometallurgie zur Rückgewinnung von Metallen aus Elektroschrott eingesetzt (Mir und Dhawan, 2022).

Die Biohydrometallurgie ist eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen aus Elektroschrott, da sie umweltfreundlicher und kostengünstiger ist und möglicherweise zusätzliche Vorteile bietet, wie etwa die Förderung lokaler Arbeitsplätze, da sie in geringen Mengen umgesetzt werden kann (Magoda und Mekuto, 2022). Im Gegensatz dazu benötigen Bioprozesse mehr Zeit, um die gleiche Effizienz zu erreichen. Aufgrund der langen Betriebsdauer und des Zeitaufwands befindet sich diese Technologie noch in der Entwicklung für den industriellen Einsatz (Mishra et al., 2021).

Mehrere Autoren haben über mehrstufige Verfahren zur Aufbereitung von Elektroschrott zur Metallrückgewinnung berichtet. In einer Studie von Shah et al. (2015) wurde ein zweistufiger Biolaugungsprozess angewendet, um Cu, Ni und Zn aus Computerschrott zu extrahieren, wobei Eisen(III)-sulfat als Lauge verwendet wurde. Die Studie untersuchte auch die Auswirkung der Partikelgröße auf den Prozentsatz der Metallextraktion. Die Autoren beobachteten, dass der Prozentsatz der Metallextraktion anstieg, wenn die Partikelgröße von 3360 auf 74 µm abnahm. Harikrushnan et al. (2016) führten eine Studie zu integrierten biohydrometallurgischen und hydrometallurgischen Verfahren zur Biolaugung von Cu, Ni und Zn aus Computerschrott durch. Die Studie kombinierte den Einsatz von Mikroorganismen und chemischer Laugung mit Mikroorganismen des Typs *Acidithiobacillus ferrooxidans* und 2 M HNO<sub>3</sub>. Die Autoren erzielten Metallrückgewinnungsraten von 85 % für Cu, 98 % für Ni und Zn bei einer Zellstoffdichte von 50 g/l und etwa 60 % für Cu und 97–98 % für Ni und Zn bei 100 g/l. Keine dieser früheren Studien befasst sich jedoch mit der ganzheitlichen Lösung vom Rohmaterial bis zur Rückgewinnung metallischer Elemente im metallischen Zustand. Benzal et al. 2020 untersuchten einen zweistufigen Biolaugungsprozess zur Kupferrückgewinnung aus alten Handy-PCBs und erreichten hohe Kupferrückgewinnungsraten von 95–100 % in 48 Stunden, indem sie sowohl Filtrations- als auch Sedimentationsmethoden zur Biomassetrennung verwendeten und als zusätzlichen Schritt die

Zementierung zur Rückgewinnung von Kupferpulver eingeschlossen. Ansonsten beschreibt das Patent WO2019206755A1 (2018) ein Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen aus Elektroschrott. Der Prozess umfasst eine minimale mechanische Vorbehandlung, gefolgt von einer Säure- und biogenerierten Eisenlaugung zur Extraktion der gewünschten Metalle wie Cu, Ni und Co mit einer Effizienz von 80 % in weniger als 6 Stunden und 88 % in 12 Stunden. Iglesias-González et al. 2021 stellen einen zweistufigen biohydrometallurgischen Prozess vor, der die Trennung der chemischen Laugung von Kupfer mit Eisen(III) und die bakterielle Oxidation des Eisen(II)-Eisens unter Anpassung des BRISA-Prozesses (Carranza et al., 1997) umfasst. Große PCB-Abfallstücke wurden in einem Rührkesselreaktor (STR) in Kontakt mit einer Lauge zurückgehalten, die mit hoher Durchflussrate zwischen diesem STR und einem Bioreaktor zirkulierte. Mit dieser Konfiguration wurde eine Kupferextraktion von 90 % in 48 Stunden für große PCB-Abfälle erreicht, bei einem theoretisch Nullverbrauch an Lauge und ohne Emission von flüssigen Abwässern.

Es wird gezeigt eine Auswahl von Arbeiten, in denen die Rückgewinnung von Kupfer aus Elektroschrott durch Biolaugung untersucht wurde. Die meisten davon wurden in Batch-Reaktoren durchgeführt. Um einen Vergleich zwischen der Leistung von Batch- und Dauerbetrieb zu ermöglichen, zeigt Tabelle 1 für die besten Bedingungen jedes Batch-Prozesses den Gesamtprozentsatz des extrahierten Kupfers (%Cu ex ), den Prozentsatz von Kupfer in PCB (%Cu PCB ), die Zellstoffdichte (pd), die Reaktionszeit (t R ) und die volumetrische Kupferproduktivität (Q Cu ). Letztere berechnet sich wie folgt:

Es wurde die höchste Produktivität der Kupfer-Biolaugung von Wu et al. (2018) mit einem Wert von 281 mg/L·h erzielt. Yacizi und Devici (2014) erzielten jedoch mit der abiotischen Laugung von Eisen(III)-sulfat Produktivitäten von bis zu 1850 mg/L·h. Sie erzielten dieses Ergebnis in einem 750-ml-Doppelmantelreaktor mit einem Schrägblattrührer bei 650 U/min mit PCBs mit 1 % Zellstoffdichte (18,5 % Cu-Gehalt) unter 250 µm Größe, die mit einer Eisen(III)-Konzentration von 0,5 M und 0,53 M Schwefelsäure bei 50 °C ausgelaugt wurden. Dies scheint darauf hinzudeuten, dass die Maximalwerte der Produktivität der Kupfer-Biolaugung aus PCBs überwunden werden können, wenn mit hohen Eisen(III)-Konzentrationen und bei höheren Temperaturen gearbeitet wird. Dies kann erreicht werden, indem wir mit einem Prozessaufbau arbeiten, bei dem chemische und biologische Reaktionen getrennt werden, wie es in unserer früheren Arbeit getan wurde (Iglesias-González et al., 2021). Darüber hinaus ist die Größe der PCB ein Schlüsselfaktor, da die Eisen(III)-Auslaugung von Kupfer aus PCB ein durch Massentransfer begrenzter Prozess ist (Iglesias-González et al., 2021). Daher wurde in der vorliegenden Arbeit die chemische Eisen(III)-Auslaugung des Kupfers aus den PCB mit kleineren PCB-Stücken durchgeführt als in unserer früheren Arbeit (PCB-Größe zwischen 0,8 und 2 mm statt 10 mm); höhere Eisen(III)-Konzentration (40 g/l statt 20 g/l) und höhere Temperatur (60 °C statt 30 °C).

Dementsprechend besteht weltweite Übereinstimmung darüber, dass die Kinetik dieser Kupferauslaugung im Wesentlichen von der Größe der PCB-Partikel, der Konzentration des Auslaugmittels ( $\text{Fe}^{3+}$ ) und der Temperatur beeinflusst wird.

Nach unserem Vorschlag (Iglesias-González et al., 2021, Iglesias-González et al., 2022) wäre es möglich, diese letzte Stufe in einem Verfahren zu optimieren, bei dem die chemische Stufe in einem anderen Reaktor durchgeführt wird als die Biooxidation. Die kontinuierliche Biooxidation von Eisen(II)-Ionen kann in verschiedenen Bioreaktortypen durchgeführt werden, beispielsweise in Rührkesseln (Ojumu et al., 2008, Candy et al., 2009), rotierenden biologischen Kontaktoren, Festbettreaktoren (Mazuelos et al., 2000, Chowdhury und Ojumu, 2014, Abbasi et al., 2021), Fließbettreaktoren und Airlift-Reaktoren (Kaksonen et al., 2014, He et al., 2022). Die höchste Biooxidationsrate ( $5,8 \text{ g/l/h}$ ) wird in gefluteten Festbettbioreaktoren erreicht (Mazuelos et al., 2000). Die Lösungsmittlextraktion wird häufig in der nachgelagerten Verarbeitung in (bio-) hydrometallurgischen Prozessen angewendet. Bei diesem Vorgang werden organische Reagenzien wie Kerosin oder Extraktionsmittel verwendet, wobei die Wahrscheinlichkeit besteht, dass Spuren davon in den Bioreaktor gelangen. Diese organischen Verbindungen können chemolithotrophe eisenoxidierende Bakterien wie *Leptospirillum ferriphilum*, *Leptospirillum ferrooxidans* und *Acidithiobacillus ferrooxidans* stark hemmen (Mazuelos et al., 2000, Dopson et al., 2006, Watling et al., 2009, Davis-Belmar et al., 2012, Liu et al., 2015, Vyrides et al., 2015, Vardanyan und Vyrides, 2019). Die hemmende Wirkung kann das mikrobielle Wachstum und den eisenoxidierenden Stoffwechsel irreversibel um bis zu 75 % verlangsamen. Zur Lösung dieses technischen Problems wurden mehrere Lösungen vorgeschlagen:

- Vermeidung des Austretens organischer Stoffe aus Lösungsmittlextraktionskreisläufen (Davis-Belmar et al., 2012).
- Eine Vorbehandlung von wässrigem Raffinat basierend auf der Adsorption durch Aktivkohle (Mazuelos et al., 2000).
- Entgiftung der Wachstums Umgebung durch gleichzeitige Inokulation von autotrophen Acidophilen mit heterotrophen Acidophilen wie *Acidiphilium acidophilum* (Watling et al., 2009), *Candida* spp. (Vyrides et al., 2015) oder anderen acidophilen Hefen (Vardanyan und Vyrides, 2019).

Schwermetallresistenz ist bei acidophilen Biomining-Mikroorganismen wohlbekannt (Li und Ke, 2001, Pourhossein und Mousavi, 2018, Ramos-Zúñiga et al., 2019). Diese Toleranzfähigkeit gegenüber Schwermetallen, die üblicherweise in Sickerwässern aus der PCB-Eisen-Auslaugung vorhanden sind, hängt von der Art des Inokulums, den Protokollen für den Anpassungsprozess und der Zusammensetzung des Wachstumsmediums ab, daher die Streuung der Ergebnisse in der Literatur (Orrel et al., 2010). Beispielsweise ermöglichen in kontinuierlich gefluteten Festbett-Bioreaktoren zur Eisen(II)-Konzentration, die mit *Acidithiobacillus ferrooxidans* und *Leptospirillum ferrooxidans* beimpft wurden, eisenoxidierende Mikroorganismen bei schrittweiser Erhöhung der Cu-Konzentration ein Arbeiten bei Cu-Konzentrationen von bis zu  $20 \text{ g/l}$  mit Rückgängen der Eisen-

Biooxidationsraten von weniger als 15 % (Mazuelos et al., 2019). Diese Hemmung der mikrobiellen Aktivität ist reversibel, wenn das Cu im Futter entfernt wird.

Vor diesem Hintergrund soll in diesem Artikel die Durchführbarkeit und Zweckmäßigkeit der Anwendung eines biohydrometallurgischen Verfahrens zur Gewinnung von hochreinem Kupfer aus Leiterplattenrückständen geprüft werden. Es basiert auf dem zuvor vorgeschlagenen Verfahren zur Gewinnung von Kupfer aus sekundären Kupfersulfiden (BRISA-Verfahren, Palencia et al., 2002).

## **5. Selektive Trennung von Metallen aus Leiterplattenabfällen durch Supergravitations-unterstützte Verflüssigungstechnologie**

Diese Studie schlägt eine kombinierte Methode aus Supergravitationstechnologie und Verflüssigungstechnologie vor, um Metalle aus WPCBs zu trennen. Fe-reiche, Cu-Zn- und Cu-Sn-Phasen wurden schrittweise in Supergravitationsfeldern abgeschieden und getrennt. Zwei Schlüsselparameter, nämlich Trenntemperatur und Schwerkraftkoeffizient, wurden unter verschiedenen Bedingungen untersucht. Die optimale Temperatur betrug 1100 °C zum Trennen von Fe-reichen Legierungen und 800 °C zum Trennen von Cu-Zn- und Cu-Sn-Legierungen. Darüber hinaus wurde in dieser Studie die Kontrolle des Schwerkraftkoeffizienten auf 600 als am geeignetsten und energieeffizientesten erachtet. Unter optimalen Bedingungen erreichten die Massenanteile von Fe, (Cu + Zn) und (Cu + Sn) in Fe-reichen, Cu-Zn- und Cu-Sn-Legierungen 81,8 Gew.-%, 95,0 Gew.-% bzw. 89,9 Gew.-%. Außerdem wurde eine mögliche industrielle Vorrichtung für das neue Verfahren vorgeschlagen. Die Ergebnisse zeigen, dass das vorgeschlagene, durch Supergravitation unterstützte Verflüssigungsverfahren ein vielversprechender und optimierter Ansatz zur selektiven Trennung von Metallen aus WPCBs ist.

In der Studie wurde eine durch Supergravitation unterstützte Verflüssigungstechnologie vorgeschlagen, um Metalle selektiv aus WPCBs zu trennen und zu recyceln. Die Auswirkungen von Trenntemperatur und Schwerkraftkoeffizient auf die Rückgewinnung hochwertiger Legierungen wurden untersucht.

## **6. Abschätzung der Unsicherheit des Metallgehalts in einer Charge von Abfalleiterplatten aus Computer-Motherboards**

Es gibt neue Erkenntnisse zur Abschätzung der Unsicherheit des Metallgehalts in einer Charge von Abfalleiterplatten aus Computer-Motherboards (Touzé et al., 2024). Touzé et al. (2024) präsentieren einen empirischen Ansatz, der auf wiederholten Messungen basiert, um die Unsicherheiten bei der Probenentnahme im Recyclingprozess zu schätzen. Die Studie zeigt, dass die Unsicherheiten bei der Probenentnahme unabhängig von der Metallkonzentration sind, unabhängig davon, ob diese im Bereich von wenigen ppm oder mehreren Prozent liegt. Ein zentrales Ergebnis der Untersuchung ist, dass die Größenverteilung der Metallpartikel eine entscheidende Rolle für die Unsicherheiten spielt. Diese Verteilung wird maßgeblich durch das Verhalten der Metalle während des

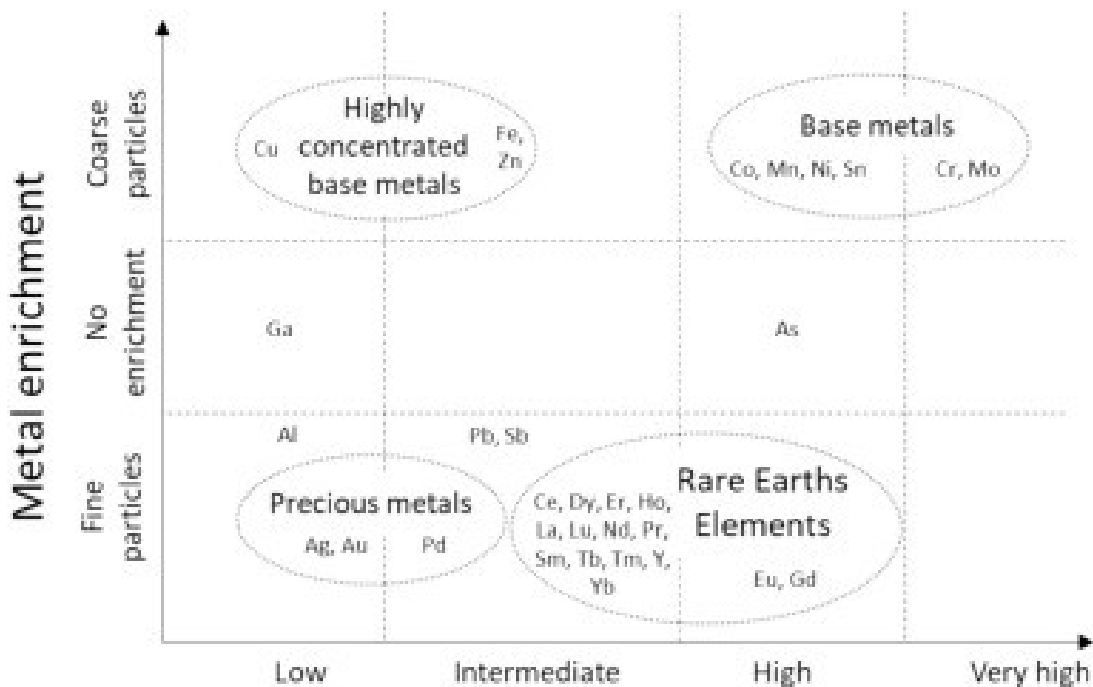
Zerkleinerungsprozesses beeinflusst. Daher ist die Partikelgrößenverteilung der Hauptfaktor, der die Unsicherheiten bei der Probenanalyse bestimmt. Die erweiterten Unsicherheiten für die 33 analysierten Metalle variieren je nach Element erheblich und reichen von 1,14 (Aluminium) bis 3,38 (Chrom). Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer sorgfältigen Prozesskontrolle, insbesondere bei der Zerkleinerung und Probenentnahme, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Materialanalysen im Metallrecycling zu gewährleisten (Touzé et al., 2024).

Elektronische Abfälle sind aufgrund ihres Gehalts an kritischen und Edelmetallen eine wertvolle Ressource. Um diese Abfälle in Recycling- oder Verwertungsketten einzubeziehen, muss ihr Metallgehalt genau bestimmt werden. Da die Analyse der gesamten Probe einer Charge von elektronischen Abfällen nicht praktikabel ist, sind unterschiedliche Vorbereitungs- und Probenahme- oder Teilprobenahmeschritte erforderlich. Die Probenahme führt zu einem Fehler in der Zusammensetzung der endgültigen Probe im Vergleich zu der ursprünglichen Charge, was schließlich zu einer Unsicherheit bei der Messung des endgültigen Metallgehalts im Vergleich zum „tatsächlichen“ Metallgehalt der Charge führt. Ziel war es, die Unsicherheit des Metallgehalts einer Charge von 372 kg WPCB zu charakterisieren. 39 Metalle wurden analysiert und 32 berücksichtigt: unedle, Edelmetalle, Seltene Erden und kritische Metalle. Daher wurde eine empirische Methode (d. h. wiederholte Messtests) angewendet, die auf statistischen Berechnungen gemäß den Eurachem-Richtlinien basiert. Die Unsicherheit, die während der 3 verschiedenen Phasen des Vorbereitungsprozesses (primäre, zweite und tertiäre Probenahmeschritte) auftritt, wurde berechnet. Für das analysierte vorgegebene Gewicht (0,5 g) erwies sich die Zerkleinerungseffizienz, die sich direkt auf die Größenverteilung der Metallpartikel auswirkt, als der wichtigste Faktor, der die Unsicherheit beeinflusst. Unsicherheiten im Gehalt an unedlen Metallen, die oft in den größten Partikeln konzentriert sind, entstanden hauptsächlich aus dem letzten Aufbereitungsschritt (tertiäre Probenahme). Im Gegensatz dazu wurden Edelmetalle und Seltene Erden während der 3 Aufbereitungsschritte fein gemahlen, was zu geringen Unsicherheiten führte, trotz ihrer geringen Konzentration im Abfall ( $<337$  mg/t für Edelmetalle und  $< 35$  mg/t für Seltene Erden).

Ziel dieser Studie war zunächst die Beschreibung einer neuen und effizienten Probenahme- und Vorbereitungsmethode, die speziell für WPCB entwickelt wurde. Die Probenahmemethode wurde an die Analysebeschränkungen hinsichtlich zulässiger Masse und Partikelgröße angepasst. Zur Bestimmung des Metallgehalts wurde Königswasseraufschluss gefolgt von ICP angewendet. Das Hauptziel bestand dann darin, das Vertrauensintervall für die Konzentration von etwa 32 Metallen in einer Gesamtprobe von 372 kg WPCB zu schätzen. Ein Unsicherheitsfaktor wurde gemäß dem empirischen Ansatz unter Verwendung eines Wiederholungsexperiments geschätzt. Dieser Versuchsplan wurde verwendet, um den relativen Beitrag jedes Probenahmeschritts zur Gesamtunsicherheit zu schätzen. Ein Versuchsdesign mit Wiederholungsdaten wurde erstellt.

Zur Gegenüberstellung der verschiedenen Ergebnisse wurde ein schematisches Diagramm vorgeschlagen. Der Vergleich zwischen der Anreicherung einiger Partikelgrößenfraktionen und dem

Unsicherheitsfaktor ist in Abb. 5 dargestellt . Dadurch können vier Metallkategorien mit unterschiedlichem Verhalten hervorgehoben werden.



### Uncertainty on metal content measurement

Abb. X. Schematische Darstellung zum Vergleich von Metallanreicherung und Metallgehaltsunsicherheit. Die Unsicherheitsschwellenwerte bei der Messung des Metallgehalts sind: Niedrig  $F_u < 1,2$ , Mittel  $1,2 \leq F_u < 1,5$ , Hoch  $1,5 \leq F_u < 2$ , sehr hoch  $F_u \geq 2$ . Die Schwellenwerte für die Metallanreicherung sind: Größenverhältnis für feine Partikel  $< 1$ , keine Anreicherung  $1 \leq \text{Größenverhältnis} < 1,3$  und Größenverhältnis für grobe Partikel  $\geq 1,4$ .

Eine solche Methodologie wurde bereits in Hubau et al. (2022) auf eine begrenzte Auswahl von Metallen (Co, Cu, Fe, Ni, Pb und Zn) angewendet. Es ist nicht möglich, die Varianzschätzungen zwischen der vorherigen und dieser Studie direkt zu vergleichen, da es sich weder um dieselbe WPCB-Charge (WPCB aus der Kategorie kleine Elektro- und Elektronik-Altgeräte vs. WPCB von Computer-Motherboards) noch um denselben Probenahmeplan handelte. Insbesondere wurde der letzte Zerkleinerungsschritt mit einem Lochsieb von 750  $\mu\text{m}$  durchgeführt, das viel größer war als das in dieser Studie verwendete (200  $\mu\text{m}$ ). Die Partikelgrößenverteilung in der „750- $\mu\text{m}$ -Probe“ von Hubau et al., 2019 wurde erneut analysiert, um die Konsistenz zwischen der Metallverteilung durch die Größenfraktionen und F U -Faktoren zu bewerten (die Daten sind in Tabelle S3 im Zusatzmaterial aufgeführt ). Die Ergebnisse beider Studien weisen eine hohe Übereinstimmung auf: 1) Fe, Cu, Ni und Zn sind hauptsächlich in den größten Partikeln verteilt. 2) Für Fe und Cu besteht eine weitaus geringere Unsicherheit als für Ni und Zn und 3) Co und Pb sind unabhängig von der Partikelgröße relativ gleichmäßig in den Partikeln verteilt.

Diese Studie befasst sich mit der Probenunsicherheit im Zusammenhang mit dem Metallgehalt in Proben von Altleiterplatten. Das Hauptziel bestand darin, das Vertrauensintervall für die



Konzentration von etwa 32 Metallen in einer Gesamtprobe von 372 kg WPCB abzuschätzen. Der Unsicherheitsfaktor wurde nach dem empirischen Ansatz mithilfe eines Wiederholungsexperiments (Eurachem-Methode) abgeschätzt. Die Probenunsicherheit, die sich aus jedem Vorbereitungsschritt ergab, wurde ausgewertet und, wenn möglich, mit der Größenverteilung der Metallpartikel in der analysierten Probe korreliert.

Dabei zeigte sich, dass Edelmetalle besonders in feinen Partikeln konzentriert waren. Die Partikelfinheit implizierte eine signifikante Anzahl von Partikeln dieser Metalle in den analysierten Proben, was die mit der Probenentnahme verbundene Unsicherheit einschränkte, auch wenn ihr Gehalt nicht hoch war. Dasselbe wurde bei Seltenerdelementen beobachtet.

Die meisten unedlen Metalle hingegen ließen sich nur schwer mahlen. Dies führte zu einer Anreicherung der groben Partikel in den unedlen Metallen. Somit war der letzte Vorbereitungsschritt, bei dem von einer 2,6 kg schweren Probe bei 2 mm auf eine 0,5 g schwere Probe bei 200 µm zur Analyse übergegangen wird, der Schritt mit der größten Unsicherheit bei der Probenahme. Es könnte interessant sein, einen Zwischenschritt des Mahlens und Teilens hinzuzufügen, um die Unsicherheit der Probenahme zu verringern oder eine größere Analysemasse von beispielsweise 5 g zu entnehmen. Die aktuelle Unsicherheit war bei diesen unedlen Metallen oft recht erheblich. Dies wurde jedoch bei Cu, Fe und Zn durch deren hohe Gehalte ausgeglichen. Die Studie hat gezeigt, dass die Mahlbarkeit der einzelnen Materialien dessen Verteilung in den Proben während der Vorbereitung und somit die Unsicherheit bei der Probenahme stark beeinflusst.

Die in dieser Studie entwickelte Probenahme- und Analysemethode wurde an einer Kategorie von WPCBs durchgeführt; sie kann nun auch auf andere Kategorien von Leiterplatten angewendet werden. Auch wenn WPCBs je nach Verwendung, Herstellungsjahr und Marke sehr unterschiedliche Metallgehalte aufweisen, weisen sie starke Ähnlichkeiten auf: 1) Sie bestehen aus einer Leiterplatte, Lötmedium und Komponenten. 2) Die in den WPCBs verwendeten Metalle haben oft dieselbe Verwendung (Gold in der Beschichtung, Kupfer als Basisleiter, Aluminium als Wärmeableiter usw.) und werden daher auf gleichwertige Weise verteilt und abgelagert. Diese Beobachtung legt nahe, dass sich viele Metalle im Schredder identisch verhalten (z. B. reichert sich Gold in den Feinteilen an, Kupfer in sehr großen Mengen in den groben Partikeln). Die Größenordnungen der Unsicherheit bei bestimmten Metallen können daher auf andere Kategorien von WPCBs extrapoliert werden. Diese Hypothese könnte in Zukunft durch experimentelle Tests an neuen WPCB-Chargen und die Erstellung eines Variogramms bestätigt werden.

## **7. Bewertung der Wirksamkeit der dichte-basierten Sortierung von Kunststoffen aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten**

Die dichte-basierte Sortierung ist die am häufigsten verwendete Methode zum Sortieren von Kunststoffabfällen aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) und Altfahrzeugen (ELVs). Daher haben dichte-basierte Sortierprozesse einen großen Einfluss auf die Kunststoffmengen, die recycelt,

verbrannt oder deponiert werden. Die optimale Steuerung dieser Prozesse ist jedoch eine Herausforderung, da sich sowohl die Zusammensetzung der Kunststoffabfallströme als auch die Vorschriften zur Behandlung von Kunststoffabfällen ständig weiterentwickeln. Um das Recyclingpotenzial des behandelten Kunststoffmaterials zu maximieren, stellt dieser Artikel eine Methode zur Bewertung der Wirksamkeit dichtebasierter Sortierprozesse vor. Durch Dichtentrennungsexperimente im Labormaßstab und spektroskopische Messungen werden die Polymertypkonzentrationen und die Chlor- und Bromwerte in Abhängigkeit von der Dichte für vier Kunststofffraktionen bestimmt, die nach der dichtebasierten Sortierung entweder deponiert, verbrannt oder recycelt werden. Auf Grundlage der Ergebnisse werden Änderungen der Sortierprozesse empfohlen.

| Materials   | Method                                   | Results  |
|---|--|--|
| <p>Shredded WEEE, ELVs</p> <p>Sorting procedure</p> <p>Density 1.40 kg/l → S → Non-plastics</p> <p>F ↓</p> <p>Density 1.22 kg/l → S → Heaviest fraction</p> <p>F ↓</p> <p>Density 1.09 kg/l → S → Intermediate fraction</p> <p>F ↓</p> <p>Lightest fraction</p> <p>F: Float<br/>S: Sink</p> | <p>1. Sample preparation</p>             | <p>1. Density distributions WEEE and ELV plastic fractions</p> <p>2. Chlorine and bromine levels in function of density</p> <p>3. Polymer type concentrations in function of density</p> |
|   | <p>2. Lab-scale density separation</p>   | <p><b>Conclusions</b></p> <p>1. Suggestions for optimal medium densities during sorting</p> <p>2. Considerations on (proposed) EU restrictions on plastic sorting and recycling</p>      |
|   | <p>3. Spectroscopic characterisation</p> |  |

Die dichtebasierte Sortierung ist aufgrund ihres relativ hohen Durchsatzes, ihrer Trennleistung und Kosteneffizienz die am häufigsten angewandte Technik zur Behandlung von Kunststoffabfällen (Bauer et al., 2018; Froelich et al., 2007; Gent et al., 2009; Ragaert et al., 2017). Die Technik nutzt die Unterschiede in der Dichte der Polymere, um sie in mehrere Fraktionen zu trennen. Aufgrund der Überlappung der Dichte mancher Polymerarten müssen die Ausgangsfraktionen dichtebasierter Sortiersysteme typischerweise mit anderen Techniken weiter sortiert werden, bevor ein Recycling möglich ist.

Sortiersysteme auf Basis der Nahinfrarotspektroskopie (NIR) werden häufig eingesetzt, um Kunststoffmischungen nach Polymertyp zu sortieren und so ein mechanisches Recycling zu ermöglichen (Makenji et al., 2012). Diese Sortiersysteme profitieren von vorgeschalteten dichtebasierten Sortierschritten im Sortierverfahren, da sie die Anzahl der unterschiedlichen Polymertypen im Eingangsmaterial begrenzen. Dadurch wird die Sortierleistung deutlich verbessert. Die triboelektrostatische Trennung von Polymertypen ist eine Alternative zu NIR, ist aber normalerweise nur zum Sortieren einer binären Polymermischung wirksam (Wu et al., 2013). Daher kann diese Technik nur dann effektiv angewendet werden, wenn vorgeschaltete Sortierschritte wie

die dichtebasierte Trennung die Anzahl der unterschiedlichen Polymertypen auf weniger als drei begrenzen können.

Manchmal wird eine Kombination sensorbasierter Sortiertechniken anstelle der dichtebasierten Sortierung verwendet, um ein ähnliches Ergebnis zu erzielen. Spektroskopische Sortiersysteme auf Basis von Röntgentransmission (XRT) oder Röntgenfluoreszenz (XRF) können bis zu einem gewissen Grad Dichteunterschiede zwischen Materialien erkennen und Materialien identifizieren, die bestimmte bedenkliche Elemente wie Chlor und Brom enthalten (Maisel et al., 2020). Sie können eingesetzt werden, um bestimmte Polymere aus einer Mischung von Kunststoffabfällen vor der NIR-Trennung zu entfernen. Computer-Vision-Systeme, die durch Klassifizierungsmodelle der künstlichen Intelligenz (KI) unterstützt werden, werden manchmal auch eingesetzt, um Verunreinigungen wie Metalle, Leiterplatten (PCBs) und Kabel zu entfernen, die sonst bei der Dichtentrennung entfernt würden (Díaz-Romero, 2022). Einer der Vorteile sensorbasierter Systeme besteht darin, dass es sich im Gegensatz zu Sink-Float-Dichtentrennungsverfahren um trockene Methoden handelt. Sensorbasierte Systeme haben jedoch typischerweise geringere Durchsätze als dichtebasierte Sortierverfahren und werden daher in großen Sortieranlagen weniger eingesetzt.

Bei der Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) und Altfahrzeugen (ELVs) liegen die üblichen Dichten, bei denen Kunststoffabfälle getrennt werden, bei 1,25 kg/l, 1,10 kg/l und 1,00 kg/l (Bill et al., 2022; Strobl et al., 2021). Durch das aufeinanderfolgende Durchlaufen dieser Dichtentrennprozesse entstehen vier Dichtefraktionen von Kunststoffmaterial. Die mittleren Dichten dieser Trennprozesse werden so gewählt, dass bestimmte Polymere in einer dieser vier Dichtefraktionen konzentriert sind (Maris et al., 2015).

Die Fraktion mit der leichtesten Dichte, die mit einer Dichte von 1,00 kg/l schwimmt, besteht hauptsächlich aus den ungefüllten Polyolefinen Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) (Bill et al., 2022; Strobl et al., 2021). Nach einer weiteren Sortierung zur Gewinnung reiner PP- und PE-Ströme, die häufig mittels NIR erfolgt (Makenji et al., 2012), können die sortierten Fraktionen zu Granulaten verarbeitet und mit einem Neupolymer, Kompatibilisatoren und Additiven vermischt werden (Lange et al., 2021). Auf diese Weise werden die Eigenschaften des recycelten Materials denen des Neumaterials angenähert.

Die zweite Dichtefraktion schwimmt bei einer Dichte von 1,10 kg/l, sinkt jedoch bei einer Dichte von 1,00 kg/l. Diese Dichtefraktion besteht hauptsächlich aus gefülltem PP und nicht halogeniertem Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und hochschlagfestem Polystyrol (HIPS) (Bill et al., 2022). Wie PP und PE können das zurückgewonnene nicht halogenierte ABS und HIPS nach einem zusätzlichen NIR- oder elektrostatischen Sortierschritt mechanisch recycelt werden (Beigbeder et al., 2013). Das Fehlen von halogeniertem ABS und HIPS in dieser Fraktion ist eine kritische Voraussetzung für das Recycling. Halogenierte (hauptsächlich bromierte und chlorierte) Flammschutzmittel sind eine der am häufigsten vorkommenden Arten von Flammschutzmitteln, die ABS und HIPS zugesetzt werden, um die Brandsicherheit von Produkten aus diesen Polymeren zu erhöhen (Delva et al., 2018). Einige

früher verwendete halogenierte Flammenschutzmittel wurden in der EU jedoch mittlerweile als besonders besorgniserregende Stoffe (SVHC) bzw. persistente organische Schadstoffe (POPs) eingestuft (Wagner und Schlummer, 2020).

Bromierte Flammenschutzmittel (BFRs) wie polybromierte Diphenylether (PBDEs) und Tetrabrombisphenol A (TBBPA) gehören zu den sogenannten „Altzusätzen“, die ein Risiko für die menschliche Gesundheit darstellen, da ihre Kongenere nachweislich persistent und toxisch sind (Strobl et al., 2021). Um zu verhindern, dass diese gefährlichen Stoffe in recycelten Materialien landen, wurde eine europäische Gesetzgebung eingeführt, die die zulässige Konzentration bestimmter Altzusätze in behandelten Abfällen begrenzt. Wenn Abfälle einen der in Anhang IV der EU-POP-Verordnung (Rat der Europäischen Union, Europäisches Parlament, 2022) aufgeführten Stoffe in einer Konzentration enthalten, die die festgelegten Grenzwerte überschreitet, sollten die Abfälle so entsorgt oder verwertet werden, dass der POP-Gehalt zerstört oder irreversibel umgewandelt wird, sodass die verbleibenden Abfälle und Freisetzungen keine POP-Eigenschaften aufweisen. Die Abfälle können weiter sortiert werden, sodass der aufgeführte Stoff vom Abfall isoliert wird, vorausgesetzt, dass der isolierte Stoff zerstört oder irreversibel umgewandelt wird.

Außerhalb Europas haben sich die Länder zur Begrenzung der mit POPs verbundenen Gesundheitsrisiken hauptsächlich auf das von 152 Ländern ratifizierte Stockholmer Übereinkommen verlassen, aber keine zusätzlichen POP-Konzentrationsschwellenwerte eingeführt, die das Recycling von Kunststoffen in gleicher Weise einschränken wie die POP-Verordnung der EU (Chaine et al., 2022). Weltweit haben große Volkswirtschaften wie China, Japan, Indien, Brasilien und die Vereinigten Staaten im Einklang mit den Bestimmungen des Stockholmer Übereinkommens, das die Verwendung einer Reihe von POPs, darunter auch einiger BFRs, in neuen Produkten verbietet, erhebliche Fortschritte bei der Regulierung von POPs erzielt (Sharkey et al., 2020). Allerdings werden weltweit immer noch hohe Konzentrationen verbotener BFRs wie PBDEs in Elektro- und Elektronik-Altgeräten gefunden (Chaine et al., 2022; Melo et al., 2024).

Für PBDEs ist die von der EU festgelegte Höchstkonzentration bzw. der „Low POP Content Limit“ (LPCL) auf 500 mg/kg für die Summe aus Tetra-, Penta-, Hexa-, Hepta- und DecaBDE festgelegt (Rat der Europäischen Union, Europäisches Parlament, 2022). Dieser LPCL soll bis Ende 2025 auf 350 mg/kg und bis Ende 2027 auf 200 mg/kg gesenkt werden. Die Dichtentrennung bei einer mittleren Dichte von 1,10 kg/l ist für Kunststoffabfallsortierer eine gängige Methode, um mit dieser Vorschrift umzugehen, da dieser Prozess das nicht halogenierte von dem halogenierten ABS und HIPS bei hohem Durchsatz effektiv trennt (Delva et al., 2018). Aufgrund der flammhemmenden Additive, die die Dichte der Polymere erhöhen, sinken das halogenierte ABS und HIPS bei dieser Dichte, während das nicht halogenierte ABS und HIPS aufschwimmen.

Infolgedessen enthält die Fraktion mit der dritten Dichte, die bei einer Dichte von 1,25 kg/l schwimmt, aber bei einer Dichte von 1,10 kg/l sinkt, neben Polycarbonat (PC), PC/ABS, Polymethylmethacrylat (PMMA), Polyamid (PA), gefülltem PP und weichem Polyvinylchlorid (PVC) den Großteil des

halogenierten ABS und HIPS (Bill et al., 2022; Strobl et al., 2021). In der Praxis wird diese Fraktion häufig vollständig zur Energierückgewinnung verbrannt, um der POP-Verordnung der EU zu entsprechen, die die Zerstörung oder irreversible Umwandlung des POP-haltigen Abfalls vorschreibt, und weil eine weitere Sortierung des Abfalls, beispielsweise zur Rückgewinnung von PC/ABS, in der Regel nicht wirtschaftlich ist (Delva et al., 2018). Die Verbrennung oder Mitverbrennung dieser Abfallart ist jedoch eine Herausforderung. Die hohe Halogenkonzentration macht die Verbrennung erheblich korrosiver und die BFRs sind Vorläufer von halogenierten Dioxinen und Furanen (Schlummer et al., 2007).

Daher regelt die EU-Richtlinie 2010/75/EU (Rat der Europäischen Union, Europäisches Parlament, 2010) die Betriebsbedingungen von Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen für Abfälle, die halogenierte organische Stoffe enthalten. Für solche Abfälle muss die Gastemperatur mindestens 850 °C und die Verweilzeit mindestens 2 s betragen, wenn die Chlorkonzentration unter 1 Gew.-% liegt. Wenn die Chlorkonzentration höher als 1 Gew.-% ist, muss die Gastemperatur mindestens 1100 °C und die Verweilzeit mindestens 2 s betragen (Vermeulen et al., 2011). Zementöfen sind ein Beispiel, in dem Kunststoffabfälle häufig in festen Ersatzbrennstoff zur Mitverbrennung umgewandelt werden (Bauer et al., 2018). Zementöfen akzeptieren normalerweise nur Kunststoffabfälle mit einer Chlorkonzentration unter 1 Gew.-%, um den Betrieb bei einer höheren Gastemperatur zu vermeiden. Eine Chlorkonzentration von unter 1 Gew.-% in der dritten Dichtefraktion wird typischerweise durch den Dichtentrennungsschritt bei 1,25 kg/l erreicht, der den größten Teil des PVC (die bei weitem größte Chlorquelle) in der vierten Dichtefraktion konzentriert, die bei dieser Dichte absinkt. Diese Dichtefraktion, die schwerste, besteht hauptsächlich aus Polyvinylchlorid (PVC) und Polyoxymethylen (POM) (Maris et al., 2015; Strobl et al., 2021). Aufgrund des Fehlens der üblichen Polymere, die für das Recycling vorgesehen sind, und des hohen Halogengehalts wird diese Fraktion höchstwahrscheinlich deponiert. Der Dichtentrennungsschritt bei 1,25 kg/l wird jedoch nicht immer durchgeführt. In Fällen, in denen er nicht durchgeführt wird, wird alles Material mit einer Dichte über 1,10 kg/l entweder verbrannt, in Zementöfen mitverarbeitet oder gemeinsam deponiert, abhängig – unter anderem – vom Halogengehalt und der örtlichen Gesetzgebung (Bonifazi et al., 2021).

Da diese Abfolge von Dichtentrennungsschritten eine gängige Strategie zum Sortieren von Kunststoffen aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten und Altfahrzeugen ist, hat die Wirksamkeit dieser Prozesse erheblichen Einfluss darauf, wie viel Kunststoffabfall letztendlich recycelt, verbrannt und deponiert wird. Neben der Entwicklung besserer Geräte zur Dichtentrennung, die Gegenstand laufender Forschung ist (Dimas et al., 2022; Eggers et al., 2019), ist die optimale Steuerung dieser Prozesse der Schlüssel zu einer effektiveren Dichtentrennung. Bei Dichtentrennungsprozessen ist die mittlere Dichte der kritischste Prozessparameter, der die Reinheit und Ausbeute der Ausgabeströme beeinflusst. Wird die mittlere Dichte zu niedrig eingestellt, führt dies zu einer zu konservativen Trennung der Materialien: Es wird mehr Material verbrannt, das recycelt werden könnte, oder es

gelangt mehr Material auf die Deponie, das verbrannt werden könnte. Wird die mittlere Dichte zu hoch eingestellt, kann dies zu ungeeigneten Ausgabefractionen führen; beispielsweise kann die Konzentration einiger POP-Substanzen in einer für das Recycling bestimmten Fraktion den LPCL überschreiten.

Sortierunternehmen verwenden in der Regel die genannten oder leicht davon abweichende Mediendichten, wenn dies ihrer Erfahrung nach die Effektivität des Sortierprozesses verbessert. Die theoretisch optimale Mediendichte eines bestimmten Sortierprozesses hängt von mehreren Faktoren ab. Einer davon ist die jeweilige Abfallart, die das Sortierunternehmen verarbeitet. Ein weiterer Faktor ist die Zeit, da sich sowohl die Gesetzgebung als auch die Materialzusammensetzung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten relativ schnell ändern (Peeters et al., 2015). Darüber hinaus erhöhen Saisonalitätseffekte die Variabilität der Kunststoffabfallzusammensetzung. Ohne regelmäßige Charakterisierung des Eingangsabfalls ist es daher schwierig, die Mediendichten der Sortierprozesse konsistent anzupassen, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Um Sortierunternehmen bei der Bestimmung optimaler mittlerer Dichten zu unterstützen, präsentiert dieser Artikel eine eingehende Analyse der Wirksamkeit der Kunststoffsortierprozesse eines großen belgischen Sortierunternehmens. In früheren Untersuchungen wurden Kunststoffabfälle aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten untersucht, um die vorhandenen Polymertypen und Halogenwerte zu ermitteln (Hennebert, 2020). Einige Untersuchungen konzentrierten sich auf die Analyse von Kunststoffabfällen aus bestimmten Produkttypen (Schlummer et al., 2005; 2007; Sindiku et al., 2015). Sogar die Halogenwerte und Polymertypkonzentrationen in den verschiedenen beschriebenen Dichtefractionen wurden untersucht, um die Wirksamkeit der Reihe von Dichtentrennungsprozessen zu bewerten (Arends et al., 2015; Strobl et al., 2021; Stubbings et al., 2021). Nach bestem Wissen der Autoren wurden die Polymertypkonzentrationen und Halogenwerte innerhalb jeder dieser Dichtefractionen jedoch nie in Abhängigkeit von der Dichte untersucht. Diese Informationen sind entscheidend, um zu beurteilen, ob die in jedem Dichtentrennungsprozess verwendete mittlere Dichte gut gewählt ist. Durch die Analyse der Halogenwerte und Polymertypkonzentrationen in Abhängigkeit von der Dichte für eine hochmoderne Sortieranlage zeigt dieser Artikel auch die Auswirkungen der vorgeschlagenen Senkung der LPCL-Grenzwerte für potenziell gefährliche Stoffe auf das mechanische Recyclingpotenzial für Kunststoffabfälle.

## **8. Recycling of waste printed circuit boards by mechanical milling**

Goljandin et al. (2024) zeigt das Potenzial der zukünftigen Trends für das Recycling von WPCBs hervorgehoben. Die Integration der Schlagmahlung für WPCBs ist eine vielversprechende Technologie für die Partitionierung und Fragmentierung verschiedener Komponenten sowie für die Trennung von Fraktionen. Die mechanische Größenreduktions- und Trennungstechnologie von vorzerkleinerten WPCBs, unter Verwendung direkter und separierender Disintegratormahlung,

wurde mit anderen Technologien (Hammermahlung und Hochspannungsfragmentierung) verglichen. Die Hauptparameter, wie die spezifische Energie (ES) der WPCB-Behandlung und die Trennungsrate der verschiedenen Phasen, wurden untersucht. Erste Ergebnisse zeigen die optimalen Parameter für die Partitionierung der metallischen und nichtmetallischen Teile, die Fragmentierung und Delaminierung (spezifische Energie der Behandlung und Trennungsrate) durch Disintegratormahlung auf.

Traditionelle mechanische Mahlgeräte wie Schredder und Hammermühlen sind nicht sehr effizient, da sie die Komponenten nicht selektiv mahlen. Bei der direkten Fragmentierung mit diesen Methoden werden die Komponenten von WPCBs zwar aufgeteilt, jedoch ohne Delaminierung der Platten von der Matrix. Eine hochwertige Freisetzung und Trennung der Komponenten ist jedoch nur möglich, wenn die Verbundstruktur delaminiert wird, was jedoch ein unangemessen hohes Maß an Fragmentierung erfordert. Daher haben traditionelle mechanische Mahlmethoden einen vergleichsweise hohen Energieverbrauch. Aus diesem Grund wird nach alternativen Möglichkeiten gesucht, um die Struktur zu öffnen.

Für die mechanische Behandlung von WPCBs wurden die folgenden Geräte verwendet:

- Einrotor-Disintegratormühle DSA mit moderater Geschwindigkeit, die im Direktmodus arbeitet.
- Zweirotor-Disintegrator DSL-115 mit hoher Geschwindigkeit, der im Direkt- oder Separationsmodus betrieben wird.

Die Mahlexperimente wurden bei unterschiedlichen Energie- (Geschwindigkeits-) Levels des Mahlens durchgeführt: Direktes mehrstufiges Mahlen wurde mit dem Disintegrator DSA (bis zu 4 Durchläufe) durchgeführt, gefolgt von dem Disintegrator DSL (bis zu 16 Durchläufe).

Für die Klassifizierung des gemahlenen Produkts und die Bestimmung der Korngröße wurden Fritsch Analysette Vibrationssiebe verwendet. Nach unseren Schätzungen lag die Unsicherheit der erzielten Ergebnisse unter 2 %. Die chemische Zusammensetzung des gemahlenen Produkts (Disintegrator-Mahlanlage DSL-115 im Separationsmodus) wurde mithilfe von Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) und Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) ermittelt.

Die Ergebnisse des mehrstufigen Mahlens unter Verwendung verschiedener Disintegratoren sind in Tabelle 3 dargestellt. Laut Tabelle 3 lag der Anteil des gewünschten gemahlenen Produkts mit einer Korngröße von 1,4–0,355 mm nach der Vorzerkleinerung im DSA bei etwa 21–25 % und erreichte bis zu 41 % beim Mahlen mit dem DSL-115 bei einer nominalen Behandlungsenergie von 58,3 kWh/t und 30,5 % bei 30,8 kWh/t (erhöhte Geschwindigkeit). Der Anteil des Staubs nach der Vorzerkleinerung lag bei 17–28 %. Mit nachfolgenden Mahlvorgängen begann der Anteil der gewünschten Fraktion zu sinken. Gleichzeitig erhöhte sich der Anteil der Feinstfraktion – Staub (<0,355 mm) – auf bis zu 56–86 % bei beiden Behandlungsenergien.

Der Einfluss der spezifischen Behandlungsenergie im anschließenden separativen Mahlmodus auf die Partikelgröße des gemahlenen Produkts und den Ertrag der gewünschten Fraktion ist in

Abbildung 3 dargestellt. Die durchschnittliche Partikelgröße sank dabei monoton von 14 mm auf weniger als 0,090 mm. Laut Abbildung 3 liegt die optimale spezifische Behandlungsenergie für die Gewinnung einer geeigneten Fraktion zur Wiederverwendung von metallischen und nichtmetallischen Bestandteilen (MP und NMP) bei etwa 35–45 kWh/t. Eine Erhöhung der spezifischen Behandlungsenergie führt jedoch zu einem Anstieg der Staubmenge.

Die spezifische Behandlungsenergie  $(E_S)$  (abhängig von der Aufprallgeschwindigkeit) spielt eine wichtige Rolle für den Ertrag der gewünschten Fraktion. Mit steigender spezifischer Energie erhöhte sich der maximale Ertrag auf bis zu 48 % bei nominaler Geschwindigkeit (siehe Abbildung 3). Bei erhöhter Geschwindigkeit wird der maximale Ertrag der angegebenen Fraktion durch eine Erhöhung der spezifischen Energie  $(E_S)$  auf bis zu 37 kWh/t erreicht, wobei ein Ertrag von bis zu 31 % erzielt wird. Bei nachfolgendem Mahlen beginnt die Menge der Fraktion mit einer Partikelgröße von 1,4–0,355 mm abzunehmen, während die Menge der Feinfraktion (Staub) auf 56–86 % ansteigt.

1. Die High Intensity Impact Milling (HIIM)-Technologie und Disintegrator-Mühlen eignen sich für das Recycling von WPCBs, da sie sowohl die Fragmentierung der Leiterplatten als auch die Trennung elektronischer Bauteile sowie die Separation von metallischen und nichtmetallischen Bestandteilen ermöglichen.
2. Um eine höhere Ausbeute (Siebungsrate) der gewünschten Fraktionen zu erzielen, wird eine geringere spezifische Energie (Aufprallgeschwindigkeit) empfohlen. Bei der optimalen spezifischen Energie für die Behandlung beträgt die Ausbeute der Fraktion mit einer Partikelgröße von 1,4–0,355 mm etwa 50 %, wobei diese hauptsächlich aus metallischen Partikeln (MP) des Mahlguts besteht.
3. Die gewonnenen Daten zur Zusammensetzung der metallischen Partikel (MP) und zur proportionalen Verteilung des Metallgehalts in den verschiedenen Fraktionen sind eine wichtige Grundlage für die Entwicklung optimaler Mahl- und Separationsparameter. Diese sollten die Anforderungen der Endnutzer berücksichtigen, um die Kosten des Verfahrens und dessen wirtschaftliche Effizienz zu kalkulieren.
4. Die Nachbehandlung der Feinstfraktion ( $<0,09$  mm), die hauptsächlich aus Glasfasern und Epoxid besteht, wird durch thermische Verfahren durchgeführt.

## **9. Überblick über die Rolle der dichte-basierten Trennung beim PCB-Recycling**

In umfangreichen Forschungsarbeiten wurden verschiedene Methoden zur Behandlung von alten Leiterplatten untersucht. Es bleibt jedoch eine anhaltende Herausforderung, Verarbeitungsbedingungen zu schaffen, die sowohl wirtschaftlich tragfähig als auch effizient sind. Die Effizienz der Metallrückgewinnung aus alten Leiterplatten mittels Pyrometallurgie, Hydrometallurgie und Biometallurgie hängt davon ab, wie effektiv nichtmetallische Elemente während der Vorbehandlungsphase entfernt werden. Das Entfernen nichtmetallischer Elemente reduziert den Energie-, Chemikalien- und Biochemiebedarf und verringert den Bedarf an



zusätzlichen Reinigungsschritten. Die Verbesserung dieser Vorbehandlungstechniken könnte zu kostengünstigeren und umweltverträglicheren Lösungen für das Recycling von Leiterplatten führen und so die Effizienz und Nachhaltigkeit von Metallrückgewinnungsprozessen verbessern. In dieser Übersicht wird die Wirksamkeit von nassen und trockenen dichtebasierten Trenntechniken zur Erhöhung des Metallgehalts in zerkleinerten Leiterplattenpartikeln untersucht. Es unterstreicht die Rolle dieser Methoden bei der Optimierung der Metallrückgewinnung, der Abfallreduzierung und ihr Potenzial für ökologische und wirtschaftliche Vorteile beim Recycling von Leiterplatten. Fortschritte in Technologie und Prozessoptimierung verbessern ihre Effizienz und Bedeutung in der Elektroschrottrecyclingbranche weiter.

## **10. Fallstudie Indien: Untersuchung der Recyclingabsichten von Haushalten in Bezug auf Elektroschrott**

Vijayan et al. (2023) untersuchten die Ursachen und Konsequenzen der Recyclingabsichten für Elektroschrott und entwickelten ein konzeptionelles Modell basierend auf der Theorie des geplanten Verhaltens (TPB). In ihrer Studie wurden die Effekte von Einstellungen, subjektiven Normen und der wahrgenommenen Verhaltenskontrolle auf die Absicht von Haushaltsbewohnern, Elektroschrott zu recyceln, analysiert. Dabei hebt das Modell hervor, wie stark Gewohnheiten und Bequemlichkeit das Recyclingverhalten beeinflussen.

Die Autoren integrieren diese beiden Faktoren in einem wegweisenden Modell, das eine präzise Vorhersage des Recyclingverhaltens ermöglicht. Haushalte nehmen in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle ein, da sie maßgeblich an den Konsum-, Erzeugungs- und Managementprozessen von Elektroschrott beteiligt sind. Die Studie verdeutlicht, dass die effektive Bewältigung des Elektroschrottproblems nicht nur technische Lösungen, sondern auch ein besseres Verständnis der sozialen und verhaltensbezogenen Dynamiken im Haushaltskontext erfordert.

Durch die Kombination theoretischer Ansätze mit empirischen Daten bietet die Arbeit wertvolle Einblicke, wie Recyclinginitiativen gestaltet werden können, um die Teilnahme von Haushalten zu erhöhen und die wachsenden Herausforderungen im Umgang mit Elektroschrott anzugehen.

Basierend auf den Ergebnissen einer hierarchischen Regressionsanalyse, (i) Einstellung, subjektive Normen und wahrgenommene Verhaltenskontrolle stehen in positiver Verbindung mit der Recyclingabsicht und (ii) Recyclingabsicht, -gewohnheiten und -komfort stehen in günstiger Verbindung mit dem Recyclingverhalten in Haushalten. Die gute Erklärungskraft und Bestätigung seiner Robustheit zeigt sich darin, dass das integrierte Modell mehr als 53 % der Varianz im Recyclingverhalten von Haushalten in Bezug auf Elektroschrott erklären kann. Einstellungen und subjektive Normen erweisen sich als wichtige Bestimmungsfaktoren für die Neigung von Haushalten, Elektroschrott zu recyceln. Es besteht eine umgekehrte Beziehung zwischen der wahrgenommenen Verhaltenskontrolle und der Absicht, Elektroschrott zu recyceln.

Überraschenderweise zeigen andere Eigenschaften wie Routine und Komfort einen erheblichen Einfluss auf die Neigung der Menschen, Elektroschrott zu Hause zu recyceln.

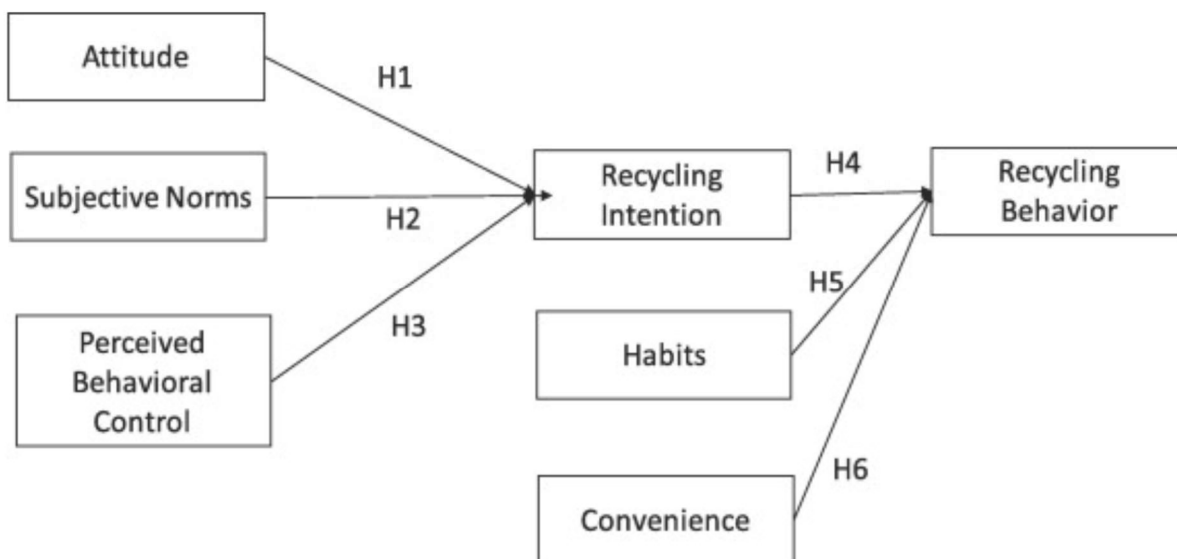
Indien: eine Analyse der Weltbank, dass Indien bei der Produktion von festem Hausmüll weiterhin zu den zehn Ländern mit der höchsten Produktion gehört (2020). Derzeit werden in Indien 170.000 t/Tag (62 Mio. t/Jahr) anfallen, bis 2050 soll diese Menge jedoch auf 436 Mio. t/Jahr steigen (Planungskommission der indischen Regierung, 2014), wobei eine jährliche Wachstumsrate von 5 Prozent zugrunde gelegt wird. Bis 2050 wird voraussichtlich fast die Hälfte der Bevölkerung des Landes in städtischen Gebieten leben, gegenüber den derzeit 31 %. Zwischen 75 und 90 % des gesamten in städtischen Gebieten produzierten Mülls werden auf offenen Mülldeponien entsorgt, was negative Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit, die Luftqualität, die Qualität des Grundwassers, die Bodenqualität und die Wirtschaft hat. Dies ist eine der größten Schwierigkeiten für die Siedlungsabfallbewirtschaftungssysteme Indiens (Kumaret al., 2017, Biswas et al., 2010, Hazra und Goel, 2009, Jha et al., 2008). Daher ist es offensichtlich, dass Indien ein umfassendes und effektives System zur städtischen Abfallbewirtschaftung schaffen und allgemein einführen muss, um den städtischen Müll zu bewältigen. Dies kann der Umwelt auf verschiedene Weise helfen, unter anderem durch Kostenersparnis, Ressourcenschonung und Verringerung der auf Mülldeponien entsorgten Abfälle. Die indische Regierung hat in den letzten Jahren mehrere neue Vorschriften zur Entsorgung von Hausmüll erlassen. Die Electronic Trash (Management) Rules, ein ähnlich eingeschränktes neues Instrument, wurden 2015 veröffentlicht. Das indische Ministerium für Umwelt, Wälder und Klimawandel ist für die Durchsetzung und Kontrolle der Einhaltung dieser Regeln zuständig, hat bisher jedoch nicht viel erreicht (Biswas et al., 2020, Kumaret al., 2017). Darüber hinaus startete der indische Premierminister 2014 eine Kampagne namens „Clean India Mission“, bei der Millionen von Regierungsmitarbeitern, öffentlichen und Bildungseinrichtungen sowie privaten Organisationen zusammenkamen, um im ganzen Land für Sauberkeit zu sorgen. Es gibt für die Stadtverwaltung „praktisch keine Möglichkeit“, eine bessere Umwelt zu schaffen, wie Joseph (2002) es ausdrückt.

Da „fast 75 % der alten Elektronikgeräte nach wie vor in Haushalten gelagert werden“, stellt die Zurückhaltung der Verbraucher, sich an Recyclingaktivitäten zu beteiligen, eine erhebliche Herausforderung für den Recyclingprozess von Elektroschrott dar, wie Kumar (2019) anmerkte. Ebenso ist die Beteiligung der Verbraucher für das erfolgreiche Recycling anderer Abfallarten von entscheidender Bedeutung, darunter Plastik (Khan et al., 2019) und Lebensmittelabfälle (Russell et al., 2017). Studien zur Einstellung der Verbraucher gegenüber dem Recycling von Elektroschrott stecken jedoch noch in den Kinderschuhen, insbesondere in Entwicklungsländern (Ikhlal, 2018, Nguyen et al., 2019). Daher zielt diese Studie darauf ab, mithilfe eines kombinierten Modells aus allgemeinen Recyclingpraktiken, Bequemlichkeit und der Theorie des geplanten Verhaltens die wichtigsten Faktoren für die Absicht und das Handeln von Haushalten in Bezug auf das Recycling von Elektroschrott in einem Entwicklungsumfeld zu untersuchen.

Wenn man das Recycling aus einer gesellschaftlichen Perspektive betrachtet, müssen Regierung, Unternehmen und Einzelpersonen zusammenarbeiten, um von der derzeitigen Konzentration auf die Entsorgung wegzukommen und sich hin zu einer Verwertung (den 3 R-Prinzipien: Reduzieren, Wiederverwenden und Recyceln) zu bewegen ( Tripathi und Shukla, 2016 , Narayana, 2009 , Talyanet al., 2008 ). Diese Arbeit ist eine Reaktion auf den Bedarf an mehr Forschung darüber, wie Menschen Elektroschrott recyceln ( Kumar, 2019 ). Außerdem erklärten Wang et al. (2011) : „Recyclinggewohnheiten spielen die wichtigste Rolle beim Recyclingverhalten von Elektroschrott und sollten als unverzichtbare Pflicht für den langfristigen Aufbau des Elektroschrottmanagements anerkannt werden“ (S. 978). Otto et al. (2018) schlugen vor, dass soziale Ansätze (wie Umweltengagement, Gewohnheiten, Normen und Motive) wahrscheinlich relevanter sind als strukturelle Maßnahmen (wie das Aufstellen von Containern und die Abholung am Straßenrand ), um die Kosten für das Recycling von Elektroschrott zu senken. Darüber hinaus sind junge Verbraucher als frühe Anwender der Prozesse des Konsums, der Erzeugung und des Managements von Elektroschrott überproportional für den explosiven Anstieg des Problems verantwortlich. Ihre Perspektive und ihr Handeln werden in Umweltstudien jedoch selten berücksichtigt . Khan et al., (2019) .

Zwar gibt es einige Literatur zum Thema Recycling von Elektroschrott, doch konzentriert sich die meiste davon auf bestimmte Länder und Gebiete (wie die Vereinigten Staaten und China). Angesichts des unverhältnismäßig hohen Anteils Indiens am weltweiten Elektroschrott füllt diese Studie eine wichtige Wissenslücke, indem sie die Recyclingmotivationen und -praktiken der Bürger dieses Landes untersucht.

Da drei Faktoren die Entscheidung einer Person, auf eine bestimmte Art und Weise zu handeln, beeinflussen, hat die Theorie des geplanten Verhaltens (TPB) als praktikable Erklärung dafür an Popularität gewonnen, warum Menschen tun, was sie tun ( Ajzen, 1991 ). Diese Voraussetzungen sind: (1) die Einstellung der Person, die ihre Einschätzung des beabsichtigten Verhaltens als vorteilhaft oder nachteilig widerspiegelt, (2) die subjektiven Normen (SN) der Person, die die Meinungen ihrer Familie, Freunde und anderer sozialer Bezugsgruppen darüber darstellen, ob die Person das beabsichtigte Verhalten an den Tag legen sollte, und (3) die wahrgenommene Verhaltenskontrolle (BC) der Person, die die Ansicht der Person darstellt, dass das beabsichtigte Verhalten leicht oder schwer umzusetzen ist ( Kumar, 2019 ). TPB steht für transformatives prozessbasiertes Modell ( Abb. 1 ). Subjektive Normen, Einstellungen und wahrgenommene Verhaltenskontrolle wirken sich laut Razali et al. (2020) positiv auf die Beteiligung von Haushalten an Mülltrennungsaktivitäten aus. Jüngste Untersuchungen von Yarimoglu und Gunay (2020) haben ergeben, dass die meisten TPB-Komponenten wichtige Treiber für die Absicht türkischer Kunden sind, grüne Hotels zu besuchen. Früheren TPB-Studien zufolge machen die oben genannten Vorbedingungen nur etwa 30 % der Varianz in den Absichten aus, sodass noch viel Potenzial für den Einfluss anderer Verhaltensfaktoren besteht ( Kautonen et al., 2015 ).



### Elektroschrott in Indien

Laut Angaben des Central Pollution Control Board (CPCB) wurden in Indien in den Jahren 2019–20 mehr als 10 Lakhs Tonnen Elektroschrott produziert, gegenüber 7 Lakhs Tonnen in den Jahren 2017–18. Trotzdem hat sich die Demontagekapazität für Elektroschrott gegenüber 782 Lakhs Tonnen in den Jahren 2017–18 nicht erhöht. (Biodiversity & Environment, E-Waste Generation, 19.10.22). In den Bundesstaaten Uttar Pradesh, Uttarakhand, Tamil Nadu und Haryana gibt es eine höhere Konzentration von Demontage- und Recyclingzentren für Elektroschrott. In den Ballungsgebieten herrscht ein Mangel an Demontageunternehmen und Recyclern, was ein großes Problem darstellt. Dadurch kann der gesamte Elektroschrott nicht ordnungsgemäß verarbeitet werden. (Jadhav, 2022). Der Regierung zufolge steigt die Menge des in Indien produzierten Elektroschrotts mit einer jährlichen Rate von 31 %.

### 1.3 . Einstellungen der Öffentlichkeit zum Recycling:

In vielen Entwicklungsländern ist die Abfallwirtschaft aufgrund steigender Bevölkerungszahlen, rascher Urbanisierung, mangelnder Aufklärung und Akzeptanz von Recyclingprogrammen sowie finanzieller Einschränkungen schwierig (Ferronato und Torretta, 2019). Trotz aller Hindernisse besteht in den in Entwicklungsländern wachsenden Sektoren Recycling und Feststoffabfallwirtschaft ein großes Potenzial für die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Ressourcen und sogar für die Schaffung neuer Arbeitsplätze (Alwaeli, 2015; Sharma et al., 2019). Sowohl die Wirtschaft als auch die Umwelt können von Recycling und städtischer Müllbewirtschaftung profitieren. Srivastava et al., (2020).

Wissen und Einstellung beeinflussen Praktiken, also die Handlungen einer Gemeinschaft (Knickmeyer, 2020, Kofoworola, 2007). Gilli et al. (2018) haben herausgefunden, dass die Einstellung und das Verhalten von Haushalten erheblich zum Erfolg von Programmen zur Müllreduzierung, -trennung, -sammlung und zum Recycling beitragen. Es stellte sich heraus, dass

umweltfreundliche Einstellungen und subjektive Normen die Menschen in Industrieländern stärker dazu ermutigen, sich an Recyclingaktivitäten zu beteiligen, als monetäre Anreize (Khanet al., 2019 , Viscusiet al., 2011 ). Außerdem ist eine Änderung der öffentlichen Einstellung und des Verhaltens, insbesondere in Entwicklungsländern, notwendig, um die Ziele einer Kreislaufwirtschaft und der Erhaltung natürlicher Ressourcen zu erreichen, wie etwa die Vermeidung und Verringerung der Abfallerzeugung und die Umsetzung geltender Abfallgesetze ( Knickmeyer 2020 ).

Coimbatore, die zweitgrößte Stadt Tamil Nadus, hat einen beträchtlichen Recyclinganteil, da die Einwohner der Stadt sich der Vorteile des Recyclings weithin bewusst sind. Trotzdem beklagten sich die Einheimischen, dass ihnen die Ressourcen und die Zeit zum Recycling fehlten (Jayasubramanian et al., 2015 ).

## **11. Fazit und Ausblick**

Dieser Übersichtsartikel bietet eine umfassende Bewertung der WPCB-Zerkleinerung und hebt ihre zentrale Rolle bei der Rückgewinnung und dem Recycling wertvoller Metalle aus Elektroschrott hervor. Da die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen abnimmt und die Elektroschrottmengen zunehmen, ist die Optimierung der Zerkleinerungsstrategien zur Verbesserung der Effizienz des Recyclingprozesses unerlässlich. Darüber hinaus hat die Umsetzung optimierter Zerkleinerungsstrategien umfassendere Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit, die mit den SDGs in Bezug auf verantwortungsvolle Produktion, nachhaltige Industrialisierung, menschliche Gesundheit und Umweltqualität in Einklang stehen (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

WPCBs stellen aufgrund ihrer Mehrkomponentenstruktur, die eine komplexe Mischung aus Polymeren, Metallen und anderen Elementen enthält, eine komplexe mechanische Herausforderung für die Zerkleinerung dar. Diese Zusammensetzung führt zu unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften und Zerkleinerungsverhalten, die durch synergistische Wechselwirkungen der Komponenten beeinflusst werden. Die Verschmelzung von Polymeren, Metallen und anderen Bestandteilen in WPCBs erzeugt ein dynamisches Wechselspiel, das sowohl Hindernisse als auch Möglichkeiten für eine effektive Zerkleinerung und Metallfreisetzung mit sich bringt (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

Die Studie zeigt, dass Scher-, Zerkleinerungs- und Schneidekräfte im Vergleich zu Mineralbrechern (Backen-, Walzen- und Scheibenbrecher) eine höhere Wirksamkeit aufweisen, jedoch mit erhöhtem Verschleiß und höheren Wartungskosten verbunden sind. Hochintensive Prallbrecher, insbesondere Hammermühlen, haben sich als umfassend erforschte Zerkleinerungsmaschinen erwiesen, die selektive Mahleffekte erzielen können, indem sie Prallkräfte nutzen, um Metalle in größeren Fraktionen freizusetzen. Die ständige Herausforderung, ein Gleichgewicht zwischen Freisetzungswirksamkeit und Übermahlung zu finden, bleibt jedoch ein zentrales Anliegen. Diese Überprüfung unterstreicht auch das Potenzial von Rotationszerkleinerern wie Hammerzerkleinerern in Bezug auf Energieeffizienz und Partikelgrößenkontrolle. Darüber hinaus könnte eine

standardisierte Zerkleinerungsterminologie die dringend benötigte Klarheit in dieses sich entwickelnde Feld bringen (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

In diesem Bericht werden die entscheidenden Aspekte der herkömmlichen mechanischen WPCB-Zerkleinerung untersucht, wobei Zerkleinerungsmechanismen, Freisetzungseffizienz, Partikelmorphologie, Fein- und Staubbildung sowie Energieverbrauch behandelt werden. Um eine optimale selektive Freisetzung zu erreichen, ist ein empfindliches Gleichgewicht zwischen Durchsatz, Rückgewinnungsrate und Feinstpartikelminimierung erforderlich, das von der Auswahl der Ausrüstung, den Betriebsparametern und den Zufuhreigenschaften beeinflusst wird. Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass es selbst bei umfassender Größenreduzierung äußerst schwierig ist, durch rein mechanisches Zerkleinern eine vollständige Freisetzung aller Komponenten zu erreichen. Es bleiben winzige Verbundpartikel mit hartnäckigen Grenzflächengrenzen bestehen, die im Anschluss fortschrittlichere Trennverfahren erforderlich machen. Zerkleinerungsmechanismen wirken sich auch erheblich auf die resultierenden Partikelformen aus und beeinflussen andere Aufbereitungsstufen. Herkömmliche Zerkleinerungsprozesse, die in erster Linie auf die Reduzierung der Materialgröße abzielen, führen unbeabsichtigt zur Entstehung von Feinstpartikeln und Staub, einem Nebenprodukt, das zwar einen wirtschaftlichen Wert hat, aber häufig zu erheblichen Umwelt- und Gesundheitsproblemen führt. Die Umweltrisiken bestehen in gefährlichem Staub, der giftige Metalle, Chlor, Brom und Feinstaub enthält und große gesundheitliche und ökologische Risiken birgt. Darüber hinaus haben Studien gezeigt, dass Zerkleinerungssysteme einen inhärenten Kompromiss zwischen Energieeffizienz und Verarbeitungsleistung eingehen müssen. Allerdings fehlen derzeit vergleichende Bewertungen der Energieeffizienz der verschiedenen Zerkleinerungstechniken (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

Im Verlauf dieser Übersicht wird deutlich, dass die Wahl der Zerkleinerungsmethode für die selektive Freisetzung wertvoller Komponenten aus WPCBs von entscheidender Bedeutung ist. Die herkömmliche mechanische Zerkleinerung ist zwar weit verbreitet, weist jedoch Einschränkungen auf, darunter einen hohen Energieverbrauch, übermäßige Feinststaubbildung und andere technische und ökologische Herausforderungen. Neue Methoden verwenden Prinzipien wie elektrische Impulse, abrasive Wasserstrahlen und kryogenes Mahlen. Jede Technik bietet einzigartige Vorteile und Herausforderungen, die für die Durchführbarkeit im industriellen Maßstab einer weiteren Bewertung und Optimierung bedürfen (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

Um optimierte WPCB-Zerkleinerungsstrategien zu realisieren, die Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit in Einklang bringen, sind Forschungsfortschritte an mehreren Fronten erforderlich. Mehrere Bereiche mit hoher Priorität verdienen besondere Aufmerksamkeit: Systematische Studien korrelieren die Zusammensetzung, Struktur und mechanischen Eigenschaften von WPCB quantitativ mit den Zerkleinerungsergebnissen unter Verwendung standardisierter, statistisch robuster Methoden. Dieses grundlegende Wissen ermöglicht die Entwicklung maßgeschneiderter Zerkleinerungsstrategien. Technoökonomische Analysen und Lebenszyklusanalysen vergleichen

neue und konventionelle Zerkleinerungstechniken unter Verwendung einheitlicher Rahmenbedingungen und datengesteuerter Modelle. Dieser Ansatz unterstützt eine fundierte Auswahl auf der Grundlage von Nachhaltigkeitsmetriken (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

Es sollten Hybridmethoden untersucht werden, die neue und traditionelle Ansätze strategisch kombinieren, um komplementäre Vorteile zu nutzen. Dieser Ansatz verspricht eine bessere Leistung als einzelne Techniken. Skalierungseffekte müssen streng evaluiert werden, wobei die Studien in Labor-, Pilot- und Industrieumgebungen mit unterschiedlichem Durchsatz durchgeführt werden müssen. Dieser Ansatz wird die Übertragung akademischer Erkenntnisse erleichtern (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

Diese Forschung befasst sich explizit mit den Anforderungen an die industrielle Zerkleinerung und demonstriert die Durchführbarkeit unter realen Bedingungen. Eine engere Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie kann die Forschungsarbeit mit den praktischen Anforderungen in Einklang bringen. Untersuchung anpassbarer mehrstufiger Zerkleinerungsstrategien und Integration prozessanalytischer Technologien zur Handhabung unterschiedlicher, sich entwickelnder WPCB-Materialien. Dieser Ansatz stellt sicher, dass das Recycling mit dem technologischen Fortschritt Schritt hält (Abbadi, Rácz & Bokányi, 2024).

## 12. Referenzen

- Ahirwar, R., & Tripathi, A. K. (2021). E-waste management: A review of recycling process, environmental and occupational health hazards, and potential solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15, 100409.
- Ahirwar, R., & Tripathi, A. K. (2021). E-waste management: A review of recycling process, environmental and occupational health hazards, and potential solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15, 100409.
- Andres U (2010) Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses. *Int J Miner Process* 97:31–38. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.07.004>
- Ardolino, F., Cardamone, G. F., & Arena, U. (2021). How to enhance the environmental sustainability of WEEE plastics management: An LCA study. *Waste Management*, 135, 347-359.
- Awasthi, A. K., Awasthi, M. K., Mishra, S., Sarsaiya, S., & Pandey, A. K. (2022). Evaluation of E-waste materials linked potential consequences to environment in India. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102477.
- Awasthi, A. K., Awasthi, M. K., Mishra, S., Sarsaiya, S., & Pandey, A. K. (2022). Evaluation of E-waste materials linked potential consequences to environment in India. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102477.
- Bachér, J., & Kaartinen, T. (2017). Liberation of Printed Circuit Assembly (PCA) and dust generation in relation to mobile phone design in a size reduction process. *Waste management*, 60, 609-617.

- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285-1303.
- Becci, A., Amato, A., Fonti, V., Karaj, D., & Beolchini, F. (2020). An innovative biotechnology for metal recovery from printed circuit boards. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104549.
- Behnamfard, A., Salarirad, M. M., & Veglio, F. (2013). Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation. *Waste management*, 33(11), 2354-2363.
- Bilesan, M. R., Makarova, I., Wickman, B., & Repo, E. (2021). Efficient separation of precious metals from computer waste printed circuit boards by hydrocyclone and dilution-gravity methods. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125505.
- Bilesan, M. R., Makarova, I., Wickman, B., & Repo, E. (2021). Efficient separation of precious metals from computer waste printed circuit boards by hydrocyclone and dilution-gravity methods. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125505.
- Bill, A., Haarman, A., Gasser, M., Böni, H., Rösslein, M., & Wäger, P. A. (2022). Characterizing plastics from large household appliances: Brominated flame retardants, other additives and density profiles. *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 105956.
- Cardamone, G. F., Ardolino, F., & Arena, U. (2022). Can plastics from end-of-life vehicles be managed in a sustainable way?. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 115-127.
- Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Dias, P. A., Cavalli, A., Georgitzikis, K., ... & Christou, M. (2023). Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU: A foresight study. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Chahinez, M. (2024). Recycling of shredded printed circuit boards (PCBs) by two-phase moving wave conveyors. *Vojnotehnički glasnik*, 72(2), 708-726.
- Chancerel, P., & Rotter, S. (2009). Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment. *Waste management*, 29(8), 2336-2352.
- Charles, R. G., Douglas, P., Dowling, M., Liversage, G., & Davies, M. L. (2020). Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE—evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104923.
- Chen, Y., Liang, S., Xiao, K., Hu, J., Hou, H., Liu, B., ... & Yang, J. (2021). A cost-effective strategy for metal recovery from waste printed circuit boards via crushing pretreatment combined with pyrolysis: Effects of particle size and pyrolysis temperature. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124505.
- Chen, Y., Liang, S., Xiao, K., Hu, J., Hou, H., Liu, B., ... & Yang, J. (2021). A cost-effective strategy for metal recovery from waste printed circuit boards via crushing pretreatment combined with



- pyrolysis: Effects of particle size and pyrolysis temperature. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124505.
- Daborn GR, Derry R (1988) Cryogenic comminution in scrap recycling. *Resour Conserv Recycl* 1:49–63. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(88\)90007-9](https://doi.org/10.1016/0921-3449(88)90007-9)
- Das, S. K., Ellamparuthy, G., Kundu, T., Angadi, S. I., & Rath, S. S. (2024). A Comprehensive Review of the Mechanical Separation of Waste Printed Circuit Boards. *Process Safety and Environmental Protection*.
- Das, S. K., Ellamparuthy, G., Kundu, T., Angadi, S. I., & Rath, S. S. (2024). A Comprehensive Review of the Mechanical Separation of Waste Printed Circuit Boards. *Process Safety and Environmental Protection*.
- Das, S. K., Ellamparuthy, G., Kundu, T., Angadi, S. I., & Rath, S. S. (2024). A Comprehensive Review of the Mechanical Separation of Waste Printed Circuit Boards. *Process Safety and Environmental Protection*.
- de Oliveira Neto, J. F., Candido, L. A., de Freitas Dourado, A. B., Santos, S. M., & Florencio, L. (2023). Waste of electrical and electronic equipment management from the perspective of a circular economy: A Review. *Waste Management & Research*, 41(4), 760-780.
- Dimas, T., Peeters, J., Eggers, A., & Vanierschot, M. (2022). Development and validation of a computational fluid dynamics model for the optimization of a sink-float separator for plastics recycling. *Procedia CIRP*, 105, 116-121.
- Ding, Y., Zhang, S., Liu, B., Zheng, H., Chang, C. C., & Ekberg, C. (2019). Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review. *Resources, conservation and recycling*, 141, 284-298.
- Directive, E. C. (2012). Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment, WEEE. *Official Journal of the European Union L*, 197, 38-71.
- Duan C, Han J, Zhao S et al (2018) The stripping effect of using high voltage electrical pulses breakage for waste printed circuit boards. *Waste Manag* 77:603–610. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.00>
- Franke DM, Suponik T, Nuckowski PM, Dubaj J (2021) Evaluation of the efficiency of metal recovery from printed circuit boards using gravity processes. *Physicochem Probl Miner Process* 57:63–77. <https://doi.org/10.37190/PPMP/138471>
- Gaur, T. S., Yadav, V., Mittal, S., & Sharma, M. K. (2024). A systematic review on sustainable E-waste management: challenges, circular economy practices, and a conceptual framework. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 35(4), 858-884.
- Gaur, T. S., Yadav, V., Mittal, S., & Sharma, M. K. (2024). A systematic review on sustainable E-waste management: challenges, circular economy practices, and a conceptual framework. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 35(4), 858-884.

- Gauß, R., Burkhardt, C., Carencotte, F., Gasparon, M., Gutfleisch, O., Higgins, I., ... & Veluri, B. (2021). Rare earth magnets and motors: A European call for action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance.
- Gidakos, E., & Akcil, A. (2020). WEEE under the prism of urban mining. *Waste Management*, 102, 950-951.
- Goljandin, D., Kulu, P., Klauson, A., & Antonov, M. (2024). Recycling of waste printed circuit boards by mechanical milling. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 73(1), 43-49.
- Gómez, M., Grimes, S., & Fowler, G. (2023). Novel hydrometallurgical process for the recovery of copper from end-of-life mobile phone printed circuit boards using ionic liquids. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138379.
- Gómez, M., Grimes, S., & Fowler, G. (2023). Novel hydrometallurgical process for the recovery of copper from end-of-life mobile phone printed circuit boards using ionic liquids. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138379.
- Gulliani, S., Volpe, M., Messineo, A., & Volpe, R. (2023). Recovery of metals and valuable chemicals from waste electric and electronic materials: a critical review of existing technologies. *RSC Sustainability*, 1(5), 1085-1108.
- Gulliani, S., Volpe, M., Messineo, A., & Volpe, R. (2023). Recovery of metals and valuable chemicals from waste electric and electronic materials: a critical review of existing technologies. *RSC Sustainability*, 1(5), 1085-1108.
- Han J, Duan C, Lu Q et al (2019) Improvement of the crushing effect of waste printed circuit boards by co-heating swelling with organic solvent. *J Clean Prod* 214:70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.28>
- Hao, J., Wang, Y., Wu, Y., & Guo, F. (2020). Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104787.
- Harris, S., Martin, M., & Diener, D. (2021). Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 172-186.
- He, H., Di, G., Gao, X., & Fei, X. (2020). Use mechanochemical activation to enhance interfacial contaminant removal: a review of recent developments and mainstream techniques. *Chemosphere*, 243, 125339.
- He, J., Huang, S., Chen, H., Zhu, L., Guo, C., He, X., & Yang, B. (2023). Recent advances in the intensification of triboelectric separation and its application in resource recovery: A review. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 185, 109308.
- He, J., Huang, S., Chen, H., Zhu, L., Guo, C., He, X., & Yang, B. (2023). Recent advances in the intensification of triboelectric separation and its application in resource recovery: A review. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 185, 109308.

- He, Y., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Kiehbardroudezhad, M., Peng, W., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2023). Environmental footprint analysis of gold recycling from electronic waste: A comparative life cycle analysis. *Journal of Cleaner Production*, 432, 139675.
- He, Y., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Kiehbardroudezhad, M., Peng, W., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2023). Environmental footprint analysis of gold recycling from electronic waste: A comparative life cycle analysis. *Journal of Cleaner Production*, 432, 139675.
- Huang, Z., Zhu, J., Wu, X., Qiu, R., Xu, Z., & Ruan, J. (2021). Eddy current separation can be used in separation of non-ferrous particles from crushed waste printed circuit boards. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127755.
- Huang, Z., Zhu, J., Wu, X., Qiu, R., Xu, Z., & Ruan, J. (2021). Eddy current separation can be used in separation of non-ferrous particles from crushed waste printed circuit boards. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127755.
- Hubau, A., Minier, M., Chagnes, A., Jouliau, C., Silvente, C., & Guezennec, A. G. (2020). Recovery of metals in a double-stage continuous bioreactor for acidic bioleaching of printed circuit boards (PCBs). *Separation and Purification Technology*, 238, 116481.
- Iglesias-González, N., Carranza, F., Mazuelos, A., Romero, R., Lorenzo-Tallafigo, J., Romero-García, A., & Ramírez, P. (2021). The BRISA process as a path for efficient copper recovery from waste PCBs. *Hydrometallurgy*, 205, 105750.
- Iglesias-González, N., Dorado, A. D., Ramírez, P., & Mazuelos, A. (2024). A high productivity bioprocess for obtaining metallic copper from printed circuit boards (PCBs). *Minerals Engineering*, 205, 108459.
- Iglesias-Gonzalez, N., Ramirez, P., Lorenzo-Tallafigo, J., Romero-García, A., Mazuelos, A., Romero, R., & Carranza, F. (2022). Copper recovery from unground printed circuit board by biogenic ferric at high solid/liquid ratio. *Minerals Engineering*, 180, 107471.
- Karal, E., Kucuker, M. A., Demirel, B., Coptu, N. K., & Kuchta, K. (2021). Hydrometallurgical recovery of neodymium from spent hard disk magnets: A life cycle perspective. *Journal of cleaner production*, 288, 125087.
- Kaya M (2020) *Electronic waste and printed circuit board recycling technologies*. Springer
- Khanna, R., Mukherjee, P. S., & Park, M. (2020). A critical assessment on resource recovery from electronic waste: Impact of mechanical pre-treatment. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122319.
- Khanna, R., Mukherjee, P. S., & Park, M. (2020). A critical assessment on resource recovery from electronic waste: Impact of mechanical pre-treatment. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122319.
- Klauson, A., Goljandin, D., Kulu, P., Antonov, M., Gustafsson, G., & Davoodi, A. (2024, January). A case study of printed circuit boards recycling by disintegrator technology. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2989, No. 1). AIP Publishing.

- Krishnan, S., Zulkapli, N. S., Kamyab, H., Taib, S. M., Din, M. F. B. M., Abd Majid, Z., ... & Othman, N. (2021). Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101525.
- Krishnan, S., Zulkapli, N. S., Kamyab, H., Taib, S. M., Din, M. F. B. M., Abd Majid, Z., ... & Othman, N. (2021). Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101525.
- Kumari, R., & Samadder, S. R. (2022). A critical review of the pre-processing and metals recovery methods from e-wastes. *Journal of Environmental Management*, 320, 115887.
- Kumari, R., & Samadder, S. R. (2022). A critical review of the pre-processing and metals recovery methods from e-wastes. *Journal of Environmental Management*, 320, 115887.
- Kumari, R., & Samadder, S. R. (2023). Evaluation of the recycling potential of obsolete mobile phones through secondary material resources identification: A comprehensive characterization study. *Journal of Environmental Management*, 345, 118550.
- Li, J., Duan, H., Yu, K., & Wang, S. (2010). Interfacial and mechanical property analysis of waste printed circuit boards subject to thermal shock. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(2), 229-236.
- Li, Z., Diaz, L. A., Yang, Z., Jin, H., Lister, T. E., Vahidi, E., & Zhao, F. (2019). Comparative life cycle analysis for value recovery of precious metals and rare earth elements from electronic waste. *Resources, conservation and recycling*, 149, 20-30.
- Long L, Sun S, Zhong S et al (2010) Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards. *J Hazard Mater* 177:626–632. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.078>
- Maisel, F., Chancerel, P., Dimitrova, G., Emmerich, J., Nissen, N. F., & Schneider-Ramelow, M. (2020). Preparing WEEE plastics for recycling—How optimal particle sizes in pre-processing can improve the separation efficiency of high quality plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104619.
- Martelo, L. M., Bastos, M. M., & Soares, H. M. (2024). Separation of the metallic and non-metallic fractions of waste printed circuit boards—A review focused on the organic swelling. *Minerals Engineering*, 206, 108529.
- Martelo, L. M., Bastos, M. M., & Soares, H. M. (2024). Separation of the metallic and non-metallic fractions of waste printed circuit boards—A review focused on the organic swelling. *Minerals Engineering*, 206, 108529.
- Mazuelos, A., Moreno-Perez, M., Perdigones, B., Ramirez, P., & Iglesias-Gonzalez, N. (2023). Ferrous iron biooxidation in a flooded packed-bed bioreactor at extreme conditions of iron concentration and acidity. *Minerals Engineering*, 204, 108408.
- Mazzarella, F., & di Piazza, A. (2024). Materie prime critiche dai rifiuti: il ruolo strategico dei RAEE. *ECONOMIA PUBBLICA*, (2023/3).

- Miliauskas, G., & Denafas, G. (2024). Technology development for the separation of multilayer composites. *Матеріали XXIV міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство»*, (5 червня 2024 р., Київ, Україна), 169-175.
- Mir, S., & Dhawan, N. (2022). A comprehensive review on the recycling of discarded printed circuit boards for resource recovery. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106027.
- Mir, S., & Dhawan, N. (2022). A comprehensive review on the recycling of discarded printed circuit boards for resource recovery. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106027.
- Mir, S., & Dhawan, N. (2022). A comprehensive review on the recycling of discarded printed circuit boards for resource recovery. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106027.
- Mishra, G., Jha, R., Rao, M. D., Meshram, A., & Singh, K. K. (2021). Recovery of silver from waste printed circuit boards (WPCBs) through hydrometallurgical route: A review. *Environmental Challenges*, 4, 100073.
- Mishra, G., Jha, R., Rao, M. D., Meshram, A., & Singh, K. K. (2021). Recovery of silver from waste printed circuit boards (WPCBs) through hydrometallurgical route: A review. *Environmental Challenges*, 4, 100073.
- Moyo, T., Chirume, B. H., & Petersen, J. (2020). Assessing alternative pre-treatment methods to promote metal recovery in the leaching of printed circuit boards. *Resources, conservation and recycling*, 152, 104545.
- Ogunseitan, O. A. (2022). Bending the curve of the electronics revolution toward a circular economy of e-waste. *One Earth*, 5(11), 1189-1193.
- Patil, T., Rebaioli, L., & Fassi, I. (2022). Cyber-physical systems for end-of-life management of printed circuit boards and mechatronics products in home automation: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00422.
- Patil, T., Rebaioli, L., & Fassi, I. (2022). Cyber-physical systems for end-of-life management of printed circuit boards and mechatronics products in home automation: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00422.
- Rahman, M. M., Sultan, M. B., & Alam, M. (2023). Microplastics and adsorbed micropollutants as emerging contaminants in landfill: A mini review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 31, 100420.
- Rahman, M. M., Sultan, M. B., & Alam, M. (2023). Microplastics and adsorbed micropollutants as emerging contaminants in landfill: A mini review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 31, 100420.
- Rajesh, R., Kanakadhurga, D., & Prabakaran, N. (2022). Electronic waste: A critical assessment on the unimaginable growing pollutant, legislations and environmental impacts. *Environmental Challenges*, 7, 100507.

- Rajesh, R., Kanakadhurga, D., & Prabakaran, N. (2022). Electronic waste: A critical assessment on the unimaginable growing pollutant, legislations and environmental impacts. *Environmental Challenges*, 7, 100507.
- Raman, P. R., Shanmugam, R. R., & Swaminathan, S. (2024). Review on the role of Density-Based separation in PCBs recycling. *Chemical Engineering Journal*, 154339.
- Rizos, V., Righetti, E., & Kassab, A. (2022). Developing a supply chain for recycled rare earth permanent magnets in the EU. *Centre for European Policies Study CEPS*.
- Schnakovszky C, Herghelegiu E, Radu C, Cristea I (2014) The influence of the feed rate on the quality of surfaces processed by AWJ at high pressures. *Adv Mater Res* 837:196–200. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.837.196>
- Schneider, A. F., & Zeng, X. (2022). Investigations into the transition toward an established e-waste management system in China: Empirical evidence from Guangdong and Shaanxi. *Current Research in Environmental Sustainability*, 4, 100195.
- Sharkey, M., Harrad, S., Abdallah, M. A. E., Drage, D. S., & Berresheim, H. (2020). Phasing-out of legacy brominated flame retardants: The UNEP Stockholm Convention and other legislative action worldwide. *Environment International*, 144, 106041.
- Shittu, O. S., Williams, I. D., & Shaw, P. J. (2021). Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. *Waste Management*, 120, 549-563.
- Stubbings, W. A., Abdallah, M. E., Misiuta, K., Onwuamaegbu, U., Holland, J., Smith, L., ... & Harrad, S. (2021). Assessment of brominated flame retardants in a small mixed waste electronic and electrical equipment (WEEE) plastic recycling stream in the UK. *Science of the Total Environment*, 780, 146543.
- Sun J, Wang W, Liu Z, Ma C (2011) Recycling of waste printed circuit boards by microwave-induced pyrolysis and featured mechanical processing. *Ind Eng Chem Res* 50:11763–11769. <https://doi.org/10.1021/ie2013407>
- Sun J, Wang W, Ma C, Dong Y (2010) Study on pyrolysis characteristics of electronic waste. In: *Proceedings of the 2009 international conference on chemical, biological and environmental engineering*. World Scientific Publishing, pp 13–16
- Suponik T, Franke DM, Nuckowski PM et al (2021) Impact of grinding of printed circuit boards on the efficiency of metal recovery by means of electrostatic separation. *Minerals* 11:1–21.
- Tolusso, E., Mascheretti, L., & Marzullo, F. (2024, June). Innovative Value Chains: Advancements in Critical Raw Materials Recovery from E-Waste for Europe's Economic Resilience. In *2024 Electronics Goes Green 2024+(EGG)* (pp. 1-5). IEEE.
- Torrubia, J., Valero, A., & Valero, A. (2023). Energy and carbon footprint of metals through physical allocation. Implications for energy transition. *Resources, Conservation and Recycling*, 199, 107281.

- Torrubia, J., Valero, A., & Valero, A. (2023). Energy and carbon footprint of metals through physical allocation. Implications for energy transition. *Resources, Conservation and Recycling*, 199, 107281.
- Touzé, S., Hubau, A., Ghestem, J. P., Moreau, P., Lafaurie, N., & Noireaux, J. (2024). Estimation of the uncertainty of metal content in a batch of waste printed circuit boards from computer motherboards. *Waste Management*, 189, 325-333.
- Tutton, C. G., Young, S. B., & Habib, K. (2022). Pre-processing of e-waste in Canada: Case of a facility responding to changing material composition. *Resources, Environment and Sustainability*, 9, 100069.
- Van den Eynde, S., Waumans, S., Dimas, T., Díaz-Romero, D. J., Zaplana, I., & Peeters, J. (2024). Evaluating the effectiveness of density-based sorting of plastics from WEEE and ELVs. *Resources, Conservation and Recycling*, 209, 107753.
- van Nielen, Sander S., Benjamin Sprecher, Teun J. Verhagen, and René Kleijn. "Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows." *Journal of Cleaner Production* 394 (2023): 136252.
- Van Yken, J., Cheng, K. Y., Boxall, N. J., Nikoloski, A. N., Moheimani, N., Valix, M., & Kaksonen, A. H. (2023). An integrated biohydrometallurgical approach for the extraction of base metals from printed circuit boards. *Hydrometallurgy*, 216, 105998.
- Van Yken, J., Cheng, K. Y., Boxall, N. J., Nikoloski, A. N., Moheimani, N., Valix, M., & Kaksonen, A. H. (2023). An integrated biohydrometallurgical approach for the extraction of base metals from printed circuit boards. *Hydrometallurgy*, 216, 105998.
- Vijayan, R. V., Krishnan, M. M., Parayitam, S., Duraisami, S. P. A., & Saravanaselvan, N. R. (2023). Exploring e-waste recycling behaviour intention among the households: Evidence from India. *Cleaner Materials*, 7, 100174.
- Vuppaladadiyam, S. S. V., Thomas, B. S., Kundu, C., Vuppaladadiyam, A. K., Duan, H., & Bhattacharya, S. (2024). Can e-waste recycling provide a solution to the scarcity of rare earth metals? An overview of e-waste recycling methods. *Science of the Total Environment*, 924, 171453.
- Vuppaladadiyam, S. S. V., Thomas, B. S., Kundu, C., Vuppaladadiyam, A. K., Duan, H., & Bhattacharya, S. (2024). Can e-waste recycling provide a solution to the scarcity of rare earth metals? An overview of e-waste recycling methods. *Science of the Total Environment*, 924, 171453.
- Wang J, Guo J, Xu Z (2016) An environmentally friendly technology of disassembling electronic components from waste printed circuit boards. *Waste Manag* 53:218–224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.036>
- Wang, L., Rem, P., Di Maio, F., van Beek, M., & Tomás, G. (2024). An Innovative Magnetic Density Separation Process for Sorting Granular Solid Wastes. *Recycling*, 9(3), 48.

- Wang, Z., Zhang, Y., Feng, P., Meng, L., Wang, J., Guo, Z., & Gong, Z. (2024). Selective separation of metals from waste printed circuit boards using supergravity-assisted liquation technology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 111801.
- Yan G, Guo J, Zhu G et al (2020) Liberation enhancement and copper enrichment improvement for waste printed circuit boards by heating pretreatment. *Waste Manag* 106:145–154. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.023>
- Yang M, Liu H, Ye B, Qian W (2021) Recycling of printed circuit boards by abrasive waterjet cutting. *Process Saf Environ Prot* 148:805–812. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.052>
- Yuan CY, Zhang HC, McKenna G et al (2007) Experimental studies on cryogenic recycling of printed circuit board. *Int J Adv Manuf Technol* 34:657–666. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0634-z>
- Zhu P, Chen Y, Wang LY et al (2013) The separation of waste printed circuit board by dissolving bromine epoxy resin using organic solvent. *Waste Manag* 33:484–488. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.003>
- Zhu, L., He, J., Zhang, X., Yang, B., Chen, H., Chen, L., & Yao, Y. (2023). Effect of particle size composition on the separation of waste printed circuit boards by vibrated gas–solid fluidized bed. *Advanced Powder Technology*, 34(1), 103926.
- Zhu, L., He, J., Zhang, X., Yang, B., Chen, H., Chen, L., & Yao, Y. (2023). Effect of particle size composition on the separation of waste printed circuit boards by vibrated gas–solid fluidized bed. *Advanced Powder Technology*, 34(1), 103926.
- Zhu, L., Zhang, M., He, J., Liu, C., Yao, Y., Xu, J., ... & Xu, X. (2021). Recovery of metal fractions from waste printed circuit boards via the vibrated gas-solid fluidized bed. *Advanced Powder Technology*, 32(2), 370-377.
- Zhu, L., Zhang, M., He, J., Liu, C., Yao, Y., Xu, J., ... & Xu, X. (2021). Recovery of metal fractions from waste printed circuit boards via the vibrated gas-solid fluidized bed. *Advanced Powder Technology*, 32(2), 370-377.