

Projektverbund für mehr Ressourceneffizienz in der bayerischen Wirtschaft
insbesondere für KMU und Handwerk – **ForCYCLE II**

Abschlussbericht

Innovative Recycling-Verfahren für Elektroschrott – IRVE

Projektleiter und durchführende Hochschule

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Bochtler
Technische Hochschule Aschaffenburg
Fakultät Ingenieurwissenschaften
Würzburger Straße 45, 63743 Aschaffenburg
Tel. 06021 / 4206816, Fax 06021 / 4206801
E-Mail ulrich.bochtler@th-ab.de

Projektmitarbeiter und -mitarbeiterinnen

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Bochtler, THAB
Dr. Katrin Bokelmann, IWKS
Wladislaw Benner, IWKS
Thomas Windhagen, IWKS
Maria Kunkel, IWKS
Thilo Brämer, IWKS
Malte Vogelgesang, IWKS
Dr. Romy Auerbach, IWKS
Bettina Sickenberger, THAB
Kristin Schroth, THAB
Anne-Catherine Probst, THAB
Fabian Hock, THAB
Sebastian Belz, THAB
Florian Beck, THAB

Kooperationspartner

Dr. Emanuel Ionescu
Fraunhofer-Projektgruppe IWKS
Brentanostraße 2a, 63755 Alzenau
Tel. 06023/32039-880
E-Mail emanuel.ionescu@iwks.fraunhofer.de

Projektlaufzeit

01.07.2019 – 30.09.2022

Aschaffenburg, September 2022

Abstract (Kurzzusammenfassung)

Im Rahmen dieses Projekts sollte ein Verfahren zur effizienten Rückgewinnung wertstoffhaltiger Bauteile aus Elektroschrott entwickelt werden. Dabei sollten zwei grundsätzlich verschiedene Vorgehensweisen geprüft und miteinander verglichen werden.

Die Technische Hochschule Aschaffenburg verfolgte den Ansatz, den Elektroschrott mittels Sensorik zu erfassen und wertstoffhaltige Baugruppen mittels Suchalgorithmen zu erkennen. Im Anschluss werden die ausgewählten Bauteile selektiv entstückt.

Die Fraunhofer-Einrichtung IWKS untersuchte im Vergleich dazu den Ansatz der selektiven Zerkleinerung mittels elektrohydraulischer Zerkleinerung und anschließender Sortierung der Bauteile.

Beide Verfahren stellen neue Perspektiven in der Rückgewinnung versorgungskritischer Rohstoffe wie Seltene Erden und Metalle (z.B. Tantal...) dar. Sie bieten Möglichkeiten, den Anteil der Sekundärrohstoffe in Deutschland zu steigern, und verfolgen damit die Rohstoffstrategie vom Januar 2020 der Bundesregierung zur Gewährung der nachhaltigen Rohstoffversorgungssicherheit Deutschlands. Eine Initiative, die ebenfalls von dem Bayerischen Wirtschaftsministerium unterstützt wird.

Inhaltsverzeichnis

Abstract (Kurzzusammenfassung)	1
Inhaltsverzeichnis	2
1 Hintergrund, Aufgabenstellung und Zielsetzung	3
2 Planung und Ablauf der Arbeiten	4
3 Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse	37
4 Praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse und Darstellung der Kooperation mit Wirtschaftspartnern	40
5 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts	41
6 Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern und im Projektverbund	41
7 Zusammenfassung	42
8 Ausblick	43
Literaturverzeichnis	44
Anhang	48
Anlage 1: Abkürzungsverzeichnis.....	48
Anlage 2: Auflistung der Kooperationspartner aus der Wirtschaft	48

1 Hintergrund, Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im großtechnischen Maßstab wird Elektronikschrott meist in mehrstufigen Zerkleinerungs- und Sortieranlagen behandelt. Geräte der IT werden im Wesentlichen manuell demontiert, um u.a. hochwertig bestückte Leiterplatten zu separieren. Diese gelangen schließlich in Sekundärhütten, in denen mittels pyrometallurgischer Prozesse Kupfer und Edelmetalle gewonnen werden. Eine Rückgewinnung von versorgungskritischen Metallen aus der Bestückung wie Tantal, Germanium, Seltene Erden erfolgt dort i.d.R. nicht. Abbildung 1 zeigt, dass diese Rohstoffe dennoch einen hohen Stellenwert in der Wirtschaft haben und ein Nachschubrisiko darstellen.

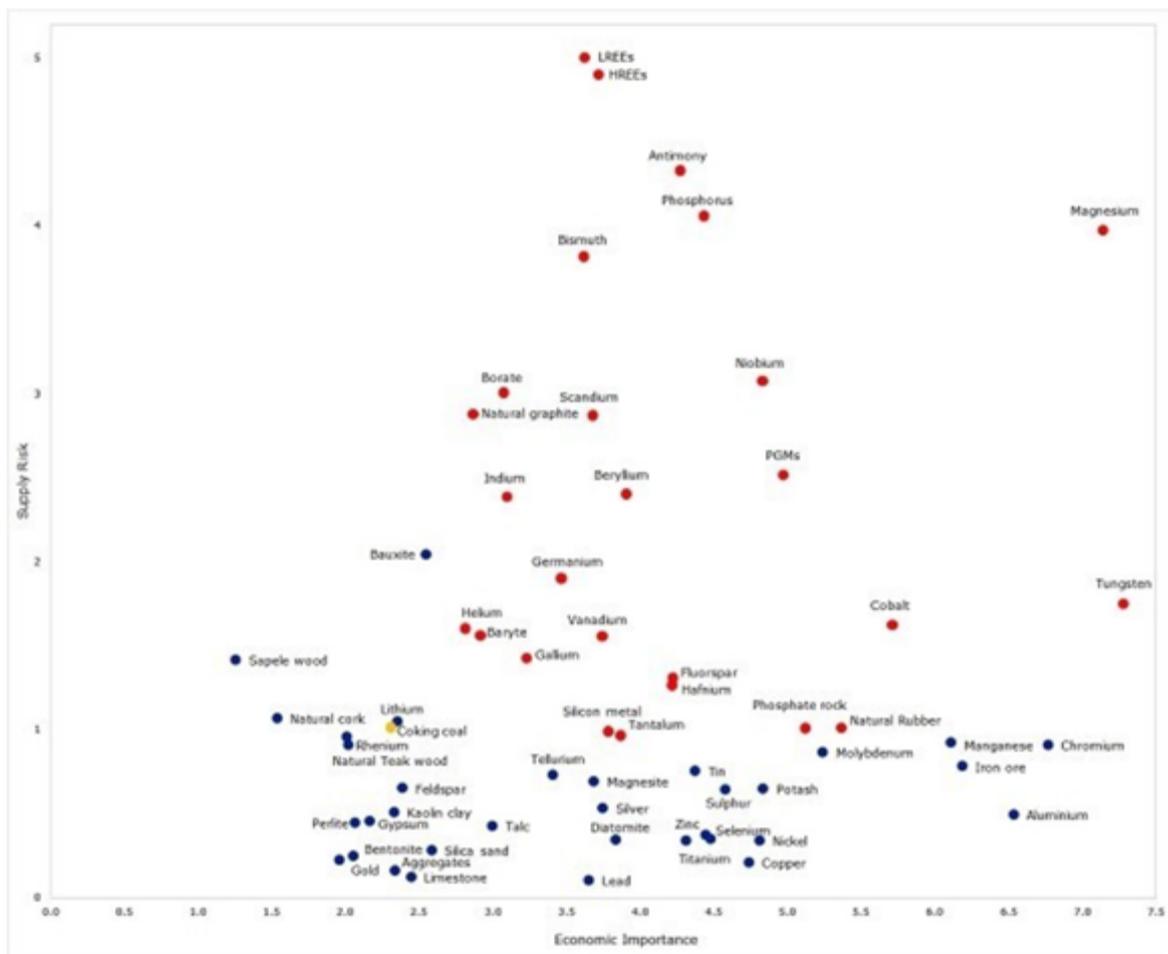


Abbildung 1: Übersicht der kritischen Rohstoffe für die EU 2017 im Hinblick auf ihre wirtschaftliche Bedeutung und den Nachschubrisiko [Kolroser 2017].

Ziel des kooperativen Projekts war es, geeignete Verfahren für das Recycling von Elektroschrott zu entwickeln und diese miteinander zu vergleichen. Dabei wurde von den beiden Projektgruppen jeweils ein Verfahren entwickelt und zum Zwecke der Aufbereitung von Leiterplatten getestet. Das angestrebte Ziel war es, festzustellen, für welche Platinenart die selektive Entstückung oder die Entstückung mittels Elektrohydraulischer Zerkleinerung und Sortierung bessere Ergebnisse in Bezug auf die Identifikation der Zielelemente sowie deren Separation und/oder Aufkonzentration liefert. Vor- und Nachteile der beiden Verfahren sollten identifiziert werden. Ein weiterer Zielaspekt findet sich in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und dem Vergleich in Bezug auf

mögliche Durchsätze (kg/Stunde). Aus diesen Untersuchungen sollten sich ebenfalls Synergien für eine großtechnische Umsetzung ergeben.

2 Planung und Ablauf der Arbeiten

Stand der Wissenschaft und der Technik

In mehreren Forschungsprojekten wurden Ansätze der sensorbasierten Erkennung von Bauteilen auf Leiterplatten verfolgt, beispielsweise von Herchenbach et al. 2013 [Herchenbach 2013], Schockert et al. 2014 [Schockert 2014] und Kopacek et al. [Kopacek 2013]. Herchenbach et al. beschäftigten sich mit der Erkennung von Komponenten auf Leiterplatten. Die Platinen werden dabei mit Kamerasystemen aufgenommen und ihr Höhenprofil vermessen. Die Arbeiten von Schockert et al. befassten sich mit der Erkennung einzelner Komponenten. Hierbei werden die Leiterplatten mittels Triangulation im 3D-Bereich vermessen und über ihre Größe identifiziert. Diese Ansätze beschränken sich jedoch jeweils nur auf sehr spezielle Bauteile. Beispielsweise wurden von Herchenbach et al. lediglich THT-Komponenten, speziell D-Sub-Stecker, erkannt. Mithilfe von Laser-Triangulation konnten Schockert et al. deutlich genauere Informationen über die Bauteile auf einer Platine erhalten. Hier wurde jedoch nur die mögliche Eignung eines solchen Sensor-Systems evaluiert, eine echte Erkennung und Unterscheidung fand nicht statt. Eine solche Klassifizierung ist auch aus Sicht der Projektpartner mit reinen Größeninformationen der Bauteile nicht möglich, da beispielsweise so nicht unterschieden werden kann, ob es sich um einen SMD-Kondensator oder SMD-Widerstand handelt. Hier erschweren gerade bei SMD-Komponenten die nach EIA-Standard genormten Baugrößen (z.B. „0805“) die Unterscheidung. Zur Rückgewinnung von Seltenen Erden zeigten die Arbeiten von Kopacek et al. die technische Machbarkeit, Bauteile selektiv aus Leiterplatten zu entfernen. Der von der Forschungsgruppe vorgeschlagene Prozess ist 2-stufig. In der ersten Stufe werden mittels einer automatischen optischen Erkennung die Eigenschaften der Leiterplatten erfasst (Platinengröße, -form, Anzahl und Position der Bauteile, Platinenmodell...). In der zweiten Stufe werden die Bauteile mittels selektiver Infraroterhitzung von den Leiterplatten entfernt.

Im kleinen Maßstab ist die Realisierung einer semiautomatischen Anlage durch Knoth et al. 2001 [Knoth 2001] bekannt. Die Bauteile, die für eine Wiederverwendung vorgesehen sind, werden dabei mittels Lasertechnologie entlötet und mithilfe eines Roboters entfernt.

Im Bereich der nicht-selektiven Entstückung wurden bereits verschiedene Ansätze veröffentlicht. Han hat 2015 eine Studie zur Entstückung mittels vertikaler Räder und Hitzezufuhr vorgestellt [Han 2015]. Die Leiterplatten werden in diesem Verfahren zuerst erhitzt und dann vertikal zwischen mehreren Rädern durchgeführt, die durch ihre Bewegung die Bauteile entfernen. Wu und Zhang haben 2010 einen Prototyp entwickelt, der alle Bauteile durch Rütteln und Wärmezufuhr von Leiterplatten entfernt [Wu 2010]. Ein weiterer Ansatz wird von der Firma Suny Group verfolgt. Bei diesem Verfahren werden Leiterplatten in einer sich drehenden Trommel erhitzt. Dabei trennen sich die Bauteile ab und werden über ein Rüttelsieb aus der Trommel herausbefördert [Suny Group 2020].

Übersicht der vor Projektbeginn bekannten Forschungen auf dem Gebiet des Leiterplattenrecyclings:

- Projekt „RECLAIM“, Kopacek et al., TU Wien, Wiedergewinnung von Indium, Gallium, Yttrium und Europium u.a. aus Photovoltaik-Anlagen, LED-Lampen und anderem Elektroschrott, Laufzeit: 01.01.2013 – 31.12.2016
- Projekt „Platinenrecycling“, Schockert et al., Herchenbach et al., RWTH Aachen, Optimierung des Recyclingprozesses durch möglichst umfangreiche optische Erfassung der Platinen, 2013
- Projekt „IRETA“, Fraunhofer ISC, Projektgruppe IWKS (heute Fraunhofer Einrichtung IWKS), Rückgewinnung von Tantal, Laufzeit: 01.10.2016 – 30.09.2019

Lösungsansatz, Arbeitsplan & -ablauf

Bereits zu Projektbeginn verfolgten die beiden Projektgruppen TH Aschaffenburg (THAB) und Fraunhofer-Einrichtung IWKS jeweils ein eigenes Recycling-Verfahren, welches sie während der Projektlaufzeit optimierten. Beide Verfahren sollten am Schluss miteinander verglichen werden, um sie dann anwendungsbedingt bestimmten Produkten zuordnen zu können. Die THAB entwickelte ein Verfahren zur selektiven Entstückung von Leiterplatten, während das IWKS ein Entstückungsverfahren mittels selektiver Zerkleinerung und Sortierung verfolgte.

Der Arbeitsplan zur Entwicklung der beiden Recycling-Verfahren bestand im Wesentlichen aus drei größeren Arbeitspaketen, wie in dem Fließschema der Abbildung 2 zusammengefasst. Da es sich um zwei voneinander unabhängige Verfahren handelt, werden Arbeitsplan und -ablauf der jeweiligen Verfahren im Folgenden getrennt beschrieben.

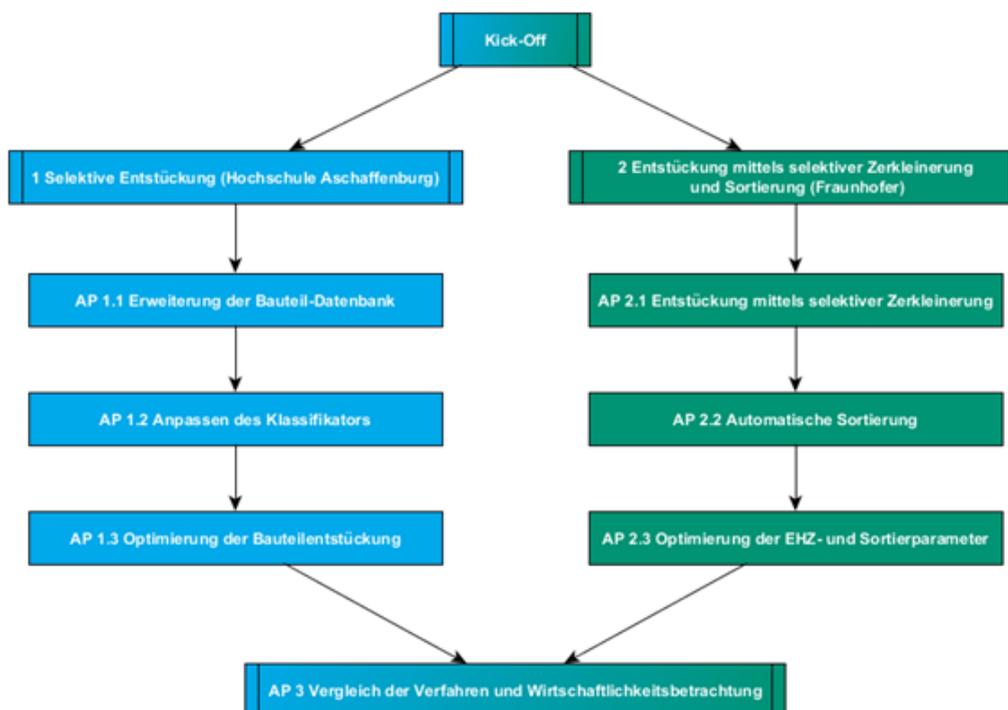


Abbildung 2: Projektfließschema

Zur Entwicklung beider Recycling-Verfahren stellte eingangs der Industriepartner MAIREC Edelmetallgesellschaft mbH den Projektpartnern größtenteils gleichartige Leiterplatten (Grafikkarten) aus Elektroaltgeräten in relevanter Menge (200 Stück) zur Verfügung (s. Abbildung 3).



Abbildung 3: Beispielhafte Abbildung einer von 200 Grafikkarten, die für die Untersuchung verwendet wurden (Quelle: IWKS 2020).

1. Selektive Entstückung (THAB)

Das von der THAB vorgeschlagene Verfahren der selektiven Entstückung basiert auf drei wesentlichen Schritten (s. Abbildung 4). Im ersten Schritt werden bestimmte Bauteilgruppen auf der Leiterplatte mittels eines computergestützten Erkennungsverfahrens detektiert. Im zweiten Schritt wird die Leiterplatte zum Aufschmelzen der Lötverbindungen vorgeheizt. Im dritten und letzten Schritt werden Bauteile ausgewählter Gruppen automatisiert entstückt.

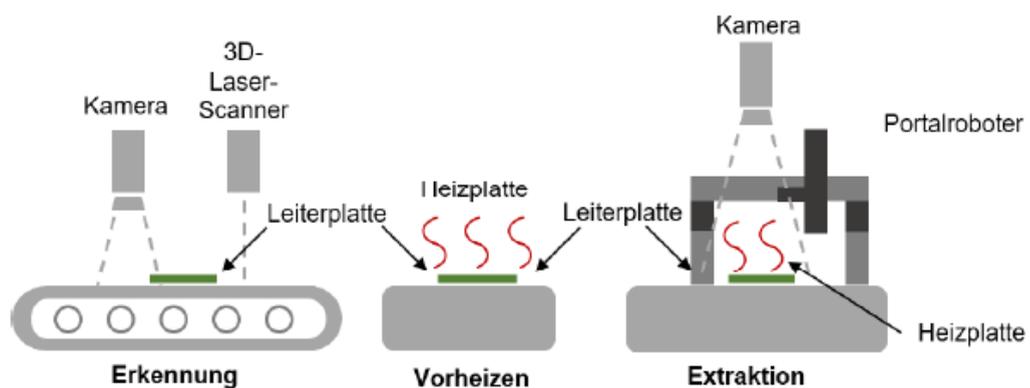


Abbildung 4: Prinzipskizze der selektiven Bauteilentstückung (Quelle: THAB 2021).

AP 1.1 Erweiterung der Bauteil-Datenbank (Technische Hochschule Aschaffenburg)

Als Basis der computergestützten Bauteilerkennung dienen 2D-Aufnahmen der Leiterplatten, welche durch eine Digitalkamera aufgenommen werden. Mittels eines künstlichen neuronalen Netzwerkes werden in diesem Bild Bauteile erkannt. Voraussetzung hierfür ist ein vorangegangenes Training des Netzwerkes. Für ein solches Training wird ein Datensatz, bestehend aus Trainings- und Testdaten, benötigt. Je mehr Daten ein neuronales Netzwerk beim Training zur Verfügung gestellt bekommt, desto besser können die Ergebnisse ausfallen.

Aus vorangegangenen Arbeiten [Hesch 2015], [Peper 2017], [Rücker 2017], [Kern 2018] lag an der THAB eine solche Bauteildatenbank vor. Sie beinhaltet eine Unterteilung in 5 Bauteilklassen: Tantal-, Elektrolytkondensatoren, integrierte Schaltkreise (ICs), Quarze und kunststoffhaltige Bauteile.

Anhand der zu Projektbeginn von der Fa. MAIREC zur Verfügung gestellten Leiterplatten erweiterte die THAB diese Datenbank um eine weitere Bauteilkategorie, die Goldkontakte. Der erweiterte Datensatz enthält ebenfalls eine erhöhte Anzahl an Bauteilen, wodurch eine Steigerung der Erkennungsrate erwartet werden kann. In Tabelle 1 ist ein Vergleich zwischen dem vor Projektbeginn und dem während der Projektlaufzeit erweiterten Datensatz dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich der bisherigen und erweiterten Bauteil-Datenbank

Klasse	Alter Datensatz (Anzahl Bauteile)	Neuer Datensatz (Anzahl Bauteile)
Tantal	2037	7739
Elko	1798	2140
IC	4249	10231
Quarz	271	560
Goldkontakte	0	1052
Kunststoff	2278	4930
Summe	10633	26652

AP 1.2 Anpassen des Klassifikators (Technische Hochschule Aschaffenburg)

Als Basis der automatisierten Bauteilerkennung dienen zwei grundlegende Ansätze: ein einstufiger und ein zweistufiger Ansatz. Bei letzterem wird die Detektion und Posenschätzung (Abschätzung der räumlichen Lage des jeweiligen Objekts) voneinander getrennt. Nach der Objekterkennung werden die erkannten Objekte beschnitten und dann von einem separaten Netzwerk zur Posenschätzung verarbeitet. Dazu muss das Bild mindestens dreimal neu abgetastet werden: Einmal für Regionsvorschläge, einmal für die Erkennung und einmal für die Posenschätzung. Die einstufige Methode erfordert im Gegensatz dazu keine erneute Abtastung des Bildes und stützt sich stattdessen auf Faltungen, um das Objekt und seine Pose in einem einzigen Vorwärtsdurchgang zu erkennen. Dies bietet einen großen Geschwindigkeitsvorteil, da das Bild nicht neu abgetastet wird und die Berechnung für die Erkennung und Posenschätzung gemeinsam genutzt wird. Zweistufige Verfahren sind beispielsweise R-CNN und Fast-R-CNN. Zur anderen Kategorie gehören Algorithmen wie YOLO, SSD und RetinaNet. Mithilfe des im Rahmen

des Projektes neu erstellten Datensatzes wurden ein R-CNN, ein MobileNet und das YOLOv4 trainiert.

In Abbildung 5 ist die Detektion mithilfe eines R-CNN zu sehen. Es wurden alle ICs sowie alle Tantal-Kondensatoren erkannt. In Abbildung 6 ist die Erkennung mittels MobileNet zu sehen. Die Erkennungsrate ist hierbei wesentlich geringer als beim Einsatz des R-CNN. Davon sind vor allem die kleineren Bauteile (Tantal-Kondensatoren und kleine ICs) betroffen. Dass es zu unterschiedlichen Erkennungsraten zwischen den ein- und zwei-stufigen Algorithmen kommt, ist in diesem Fall ein typisches Ergebnis, denn ein R-CNN bietet bedingt durch den Algorithmus eine höhere Genauigkeit und Erkennungsrate als ein MobileNet.

In Abbildung 7 ist die Erkennung anhand YOLOv4 dargestellt. Trotz des einstufigen Algorithmus ist die Erkennungsrate vergleichbar hoch wie mit der Erkennung mit dem zwei-stufigen R-CNN. Hohe Erkennungsraten mit dem YOLOv4 wurden bereits in der Literatur von Bochkovskiy et al. [Bochkovskiy 2020] beschrieben.

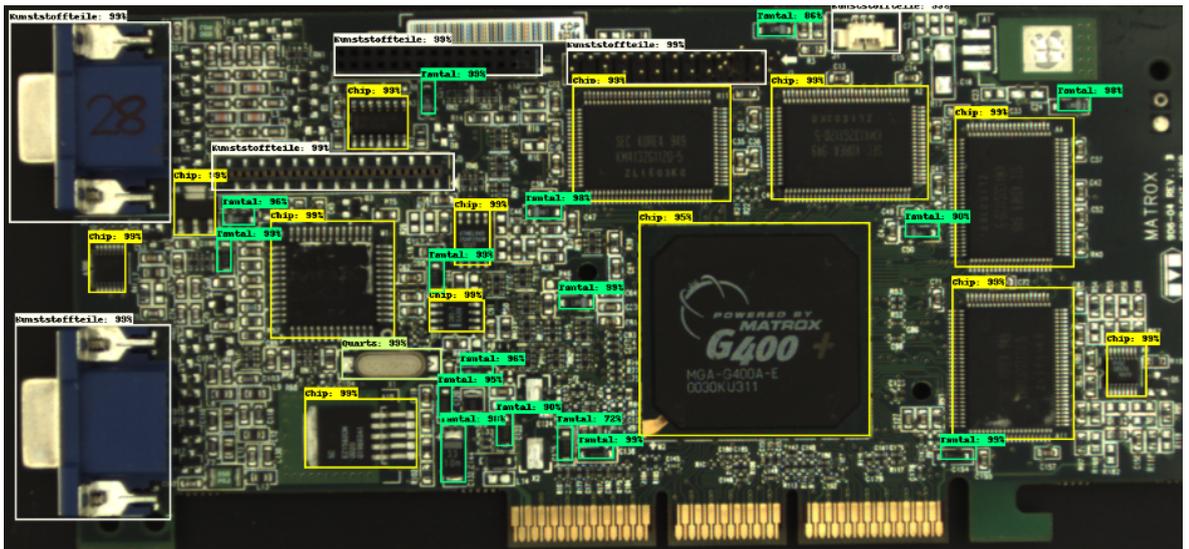


Abbildung 5: Bauteilerkennung mithilfe eines R-CNN (Quelle: THAB 2020).

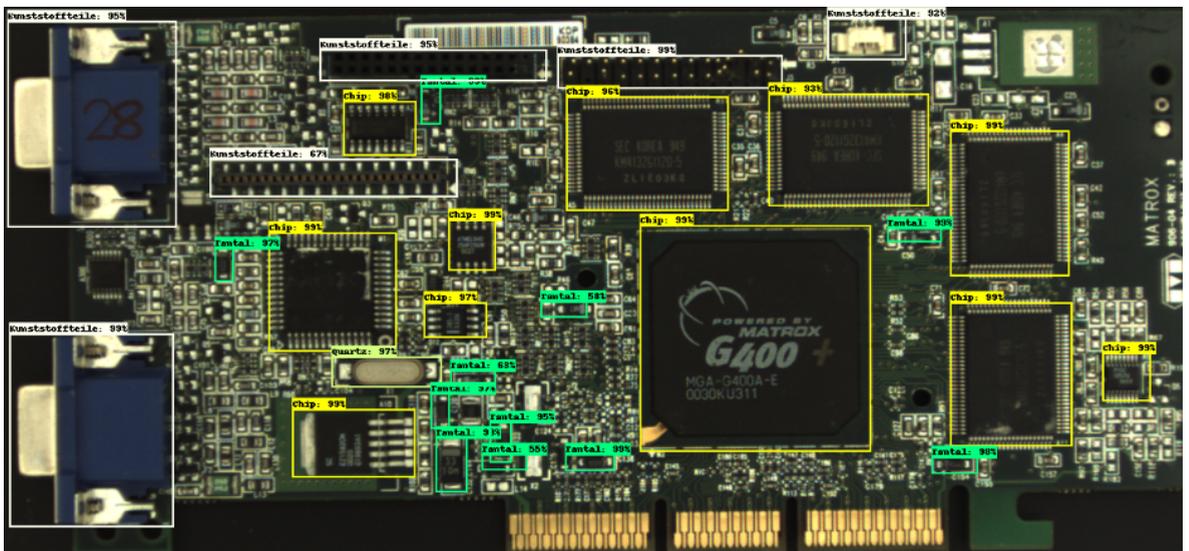


Abbildung 6: Bauteilerkennung mithilfe eines MobileNet (Quelle: THAB 2020).

Als Ergebnis der Klassifizierung erhält man eine Auflistung der erkannten Bauteile sowie deren jeweilige Position auf der Platine.

Erkennungsrate mit YOLO: Die Erkennungsrate ist abhängig von der Beleuchtung und von der Auflösung. Ist die Beleuchtung optimal, so liegt eine höhere Erkennungsrate als bei nicht optimaler Beleuchtung vor. Die Erkennungsrate ist unabhängig von der Bildauflösung und liegt für Tantal-Kondensatoren zwischen 90 und 93% (s. Abbildung 8 links). Hingegen ist eine starke Verbesserung der Erkennungsrate mit zunehmender Auflösung bei nicht optimaler Beleuchtung zu beobachten. Für Tantal-Kondensatoren liegt die Erkennungsrate bei 76 % mit einer Bildauflösung von 320 x 320 Pixel und steigt bis auf 83 % bei 768 x 768 Pixel an (s. Abbildung 8 rechts).

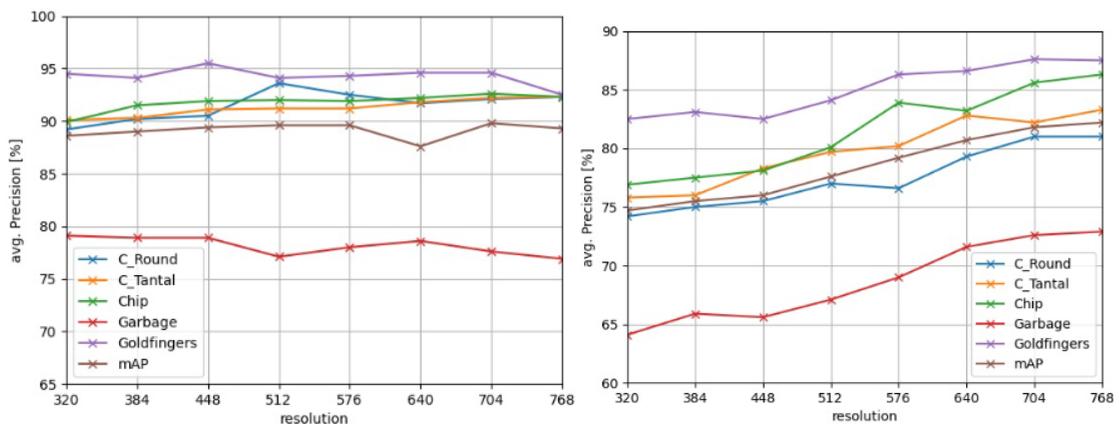


Abbildung 8: Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Bildauflösung bei optimaler (links) und bei nicht optimaler Beleuchtung (rechts) [Belz 2021]

AP 1.3 Optimierung der Bauteilentstückung (Technische Hochschule Aschaffenburg)

Die aus dem automatisierten Erkennungsverfahren erkannten und lokalisierten Bauteile sollten mittels eines zerstörungsfreien Verfahrens von der Platine entfernt werden.

In diesem Arbeitspaket sollte die zu Projektbeginn bereits umgesetzte Entstückungsanlage weiter angepasst und unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit optimiert werden.

Sie bestand aus einem Sechs-Achsen-Roboter mit einem Spezialaufsatz bestehend aus drei Komponenten:

- einem Heißluftföhn zum Aufschmelzen des Lötzinns an den zu entstückenden Bauteilen
- einem Druckluft-Aufsatz und
- einem Absaugungs-Aufsatz zur Entfernung der Bauteile.

Beim Einsatz dieser Anlage wird zur Entstückung der einzelnen Bauteile jede Bauteilposition separat angefahren, die Lötstelle aufgeschmolzen und das Bauteil entstückt. Die gesamte Recyclingprozessdauer ist damit direkt abhängig von der Anzahl der zu entstückenden Bauteile. Zum Aufschmelzen des Lötzinns an einem einzigen Bauteil werden

22 Sekunden benötigt. Für eine Leiterplatte mit 15 zu entstückenden Bauteilen werden allein zum Aufschmelzen des Lötzinns etwa 330 Sekunden benötigt. Für eine industrielle Umsetzung erweist sich dieser Vorgang als ungünstig, denn neben der hohen Prozessdauer ist die Bearbeitungsdauer von Leiterplatte zu Leiterplatte stark unterschiedlich, wodurch eine optimale Taktung schwierig ist.

Insofern wurde die Bauteilentstückung im Rahmen des vorliegenden Projektes im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des industriellen Prozesses optimiert. Insbesondere sollte die Prozessdauer zum Aufschmelzen des Lötzinns verkürzt werden und die Abhängigkeit der Bearbeitungsdauer von der Anzahl der zu bestückenden Bauteile auf die Leiterplatte reduziert werden. Dafür wurde eine Heizplatte zum Aufschmelzen sämtlicher Lötverbindungen einer Leiterplatte verwendet. Das Aufschmelzen erfolgte somit in einem einzigen Vorgang, was zu einer erheblichen Reduktion der Bearbeitungsdauer führte.

Im Wesentlichen besteht nun die Bauteilentstückung aus drei Schritten:

1. Im ersten Schritt wird durch einen Heizprozess das Lötzinn auf der Leiterplatte zum Schmelzen gebracht.
2. Anschließend werden die verschiedenen Bauteil-Positionen mit einem Industrieroboter angefahren.
3. Schließlich werden die Bauteile von der Platine entfernt.

- Zu 1. In einem Heizprozess werden die Lötverbindungen zwischen den Bauteilen und der Leiterplatte gelöst, indem das Lötzinn zum Schmelzen gebracht wird. Dafür wird die Leiterplatte auf eine Heizplatte (Weller WHP 3000) gelegt. Die Hochtemperaturstrahler werden bei maximaler Leistung (1200 W) betrieben. Das Heizen der Leiterplatte erfolgt durch IR-Wärmestrahlung und Wärmeleitung. Zwei Versuche wurden durchgeführt, um die Aufheizdauer zu optimieren. Beim ersten Versuch lagen die Leiterplatte und die Heizung in einer nicht-geschlossenen Umgebung. Zum Aufschmelzen des Lötzinns sind dabei 300 s bei max. Heizleistung erforderlich. Legt man einen Deckel über die Leiterplatte so werden Wärmeverluste deutlich reduziert. Dadurch kann der Heizvorgang auf 70 s reduziert werden.

- Zu 2. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Robotertypen betrachtet.

In der zu Projektbeginn bereits vorhandenen Entstückungsanlage kam der Sechsen-Achsen-Knickarm-Roboter Stäubli RX 90 mit Spezialaufsatz zum Einsatz (vgl. Abbildung 9). Der Roboter fährt die zuvor ermittelte Position des zu entstückenden Bauteils an und extrahiert dieses mittels Druckluft oder Vakuumabsaugung von der Leiterplatte.

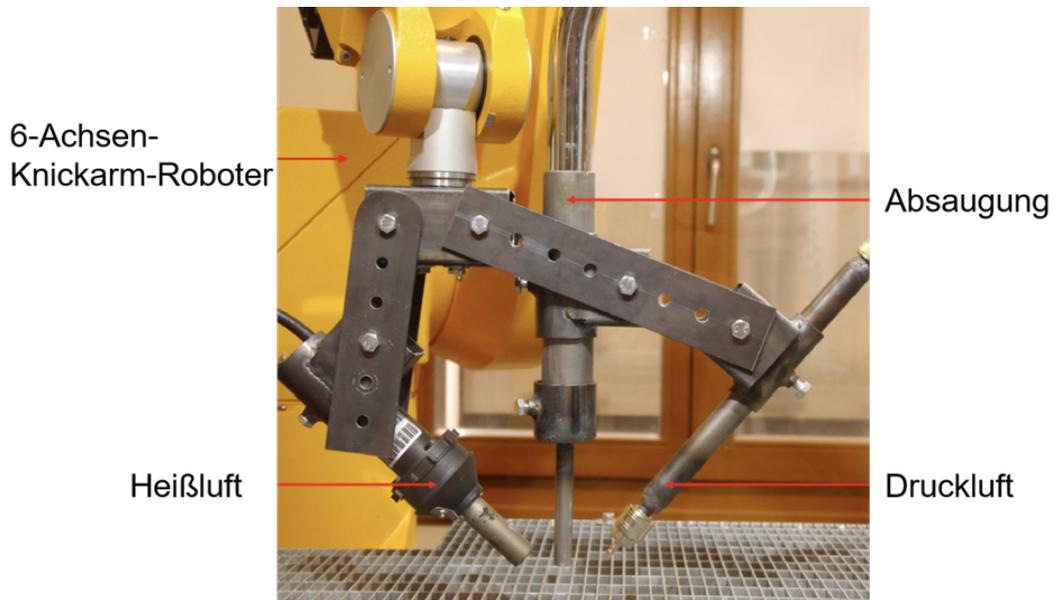


Abbildung 9: Sechs-Achsen-Knickarm-Roboter mit Entstückungsaufsatz (Quelle: THAB 2021)

Aus wirtschaftlicher Sicht ist der zuvor beschriebene Sechs-Achsen-Knickarm-Roboter mit Aufsatz eher ungeeignet. Zum einen besitzt er eine zu geringe Beschleunigung, zum anderen ist der Arbeitsraum des Sechs-Achsen-Knickarm-Roboters für den Einsatz der Leiterplattenentstückung überdimensioniert, wodurch viel potenzieller Arbeitsraum verloren geht.



Abbildung 10: Raumportal-Roboter (Quelle: THAB 2021)

Deshalb wurde ein alternatives Entstückungssystem in Form eines Portalroboters verwendet (IGUS drylin E Raumportal-Roboter). Der Portalroboter besteht aus drei Li-

near-Achsen, die hintereinander angeordnet sind und wie ein kartesisches Koordinatensystem senkrecht aufeinander stehen (vgl. Abbildung 10). Die Vorteile eines solchen Systems liegen hierbei bei:

- den hohen Verfahrgeschwindigkeiten (bis zu 500 mm/s)
- der Bewegungsunabhängigkeit einer Bewegungsachse zu den anderen Bewegungsachsen
- der optimalen Nutzung des Arbeitsraums
- dem Energiebedarf.

Zu 3. Zur Bauteilentfernung wurden zu Projektbeginn drei unterschiedliche Methoden in Erwägung gezogen:

- Bauteilentfernung mittels Greifer
 - Bauteilentfernung mittels Druckluft
 - Bauteilentfernung mittels Unterdruck.
- Bauteilentfernung mittels Greifer
Bei dieser Methode wird jedes Bauteil von einem Greifer angehoben und in einem Behälter abgelegt. Damit werden alle Bauteile an einer Stelle gesammelt. Allerdings ist diese Methode mit einer hohen Prozesszeit verbunden, da nach jeder Bauteilposition die Position des Sammelbehälters angefahren werden muss. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.
- Bauteilentfernung mittels Druckluft
Die Bauteile sollen hier mittels eines einstellbaren Luftstroms von der Leiterplatte entfernt und in einem Behälter gesammelt werden. Abbildung 11 stellt links eine fotografische Aufnahme einer Leiterplatte vor der Extraktion dar. Der Tantal-Kondensator, der entstückt werden sollte, ist hier rot markiert. In Abbildung 11 rechts ist eine Aufnahme nach dem Einsatz von Druckluft zu sehen. Zu beobachten ist, dass neben dem rot markierten Kondensator auch weitere Bauteile entfernt wurden (Vgl. mit den gelb markierten Bauteilen aus dem linken Foto). Problematisch ist hierbei, dass beim Einsatz von Druckluft nicht allein das gewünschte Bauteil von der Leiterplatte entfernt wird, sondern ebenfalls die im Umfeld liegenden Bauteile. Damit ist eine selektive Entstückung durch den Einsatz von Druckluft nicht realisierbar.

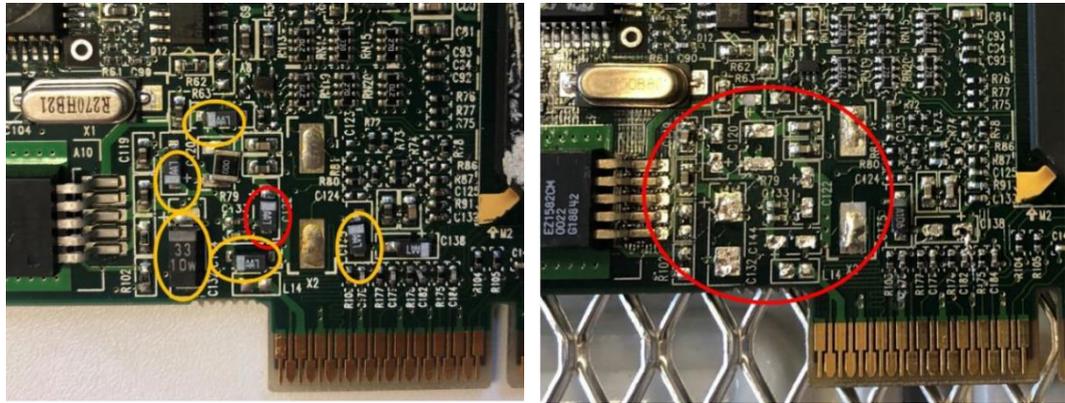


Abbildung 11: Leiterplatte vor der Extraktion (links), nach der Extraktion mittels Druckluft (rechts) (Quelle: THAB 2021)

- Bauteilentfernung mittels Unterdruck
Die Bauteilentfernung mittels Unterdruck erfolgt durch einen Asche-Staubsauger mit passendem Düsen-Aufsatz. Über einen Drehzahlregler wird das Absaugvermögen eingestellt. Dabei werden die Bauteile einzeln von der Leiterplatte abgesaugt. Das Ergebnis eines Entstückungsvorgangs mittels Unterdruck ist in Abbildung 12 dargestellt. Links ist die Leiterplatte vor der Entstückung zu sehen. Das zu entstückende Bauteil ist rot markiert. Rechts ist die Leiterplatte nach der Entstückung dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass ausschließlich das gewünschte Bauteil entstückt wurde. Die entstückten Bauteile werden anschließend in dem Sammelbehälter des Asche-Staubsaugers gesammelt. Diese Methode erweist sich somit zur selektiven Bauteilentstückung als geeignet.



Abbildung 12: Leiterplatte vor der Extraktion (links), nach der Extraktion mittels Unterdruck (rechts) (Quelle: THAB 2021).

Zusammenfassend ergeben sich für die Entstückung von 15 Bauteilen einer Leiterplatte folgende Prozesszeiten:

Stationen mit Transportzeit	Dauer
1. Erkennung - mittels YOLOv4	: 18 s
2. Vorheizen	: 73 s
3. Extraktion - mittels Unterdruck	: 55 s
Durchlaufzeit	: 146 s

Die zeitlimitierende Station ist das Vorheizen. Gleichzeitig zum Vorheizen einer Leiterplatte können an den beiden übrigen Stationen jeweils eine Leiterplatte bearbeitet werden. Somit beläuft sich der stündliche Durchsatz auf 47 Leiterplatten à 15 zu entstückenden Bauteilen.

2. Entstückung mittels selektiver Zerkleinerung und Sortierung (Fraunhofer IWKS)

Die Fraunhofer-Einrichtung IWKS verfolgte im Vergleich dazu den Ansatz der selektiven Zerkleinerung mittels Elektrohydraulischer Zerkleinerung mit anschließender sensorgestützter Sortierung der Bauteile. Die Verfahren und die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden im Folgenden dargestellt.

AP 2.1 Entstückung mittels selektiver Zerkleinerung (Fraunhofer IWKS)

Eine vom Fraunhofer IWKS erprobte, innovative Recyclingmethode stellt die sogenannte elektrohydraulische Zerkleinerung (EHZ) dar. Abbildung 13 zeigt die EHZ-Anlage im IWKS-Technikum. Hauptmerkmal dieses mechanischen Zerkleinerungsverfahrens ist eine selektive Zerkleinerung, also eine Zerkleinerung entlang von Phasengrenzen (beispielsweise Basismaterial und elektronische Komponenten einer Leiterplatte).



Abbildung 13: EHZ-Anlage im Technikumsmaßstab

Technische Spezifikationen der EHZ-Anlage:

- Arbeitsspannung von 30-40 kV
- Entladungsfrequenz von 1-4 Hz
- Automatische und manuelle Prozesssteuerung möglich
- Batch- Betrieb
- fahrbarer Mahlbehälter mit einem Fassungsvermögen von 29l

Abbildung 14 zeigt den prinzipiellen Aufbau der EHZ-Anlage. Zunächst werden Kondensatoren (sogenannte Stoßkondensatoren) über das Stromnetz geladen. Anschließend werden die Elektroden über eine Funkenstrecke elektrisch leitfähig mit den Kondensatoren verbunden, sodass sich die Kondensatoren durch eine Funkenentladung schlagartig entladen und die Ladungen über das Prozessmedium und den Behälter zur Erdung abfließen können. [Impulstec 2015]

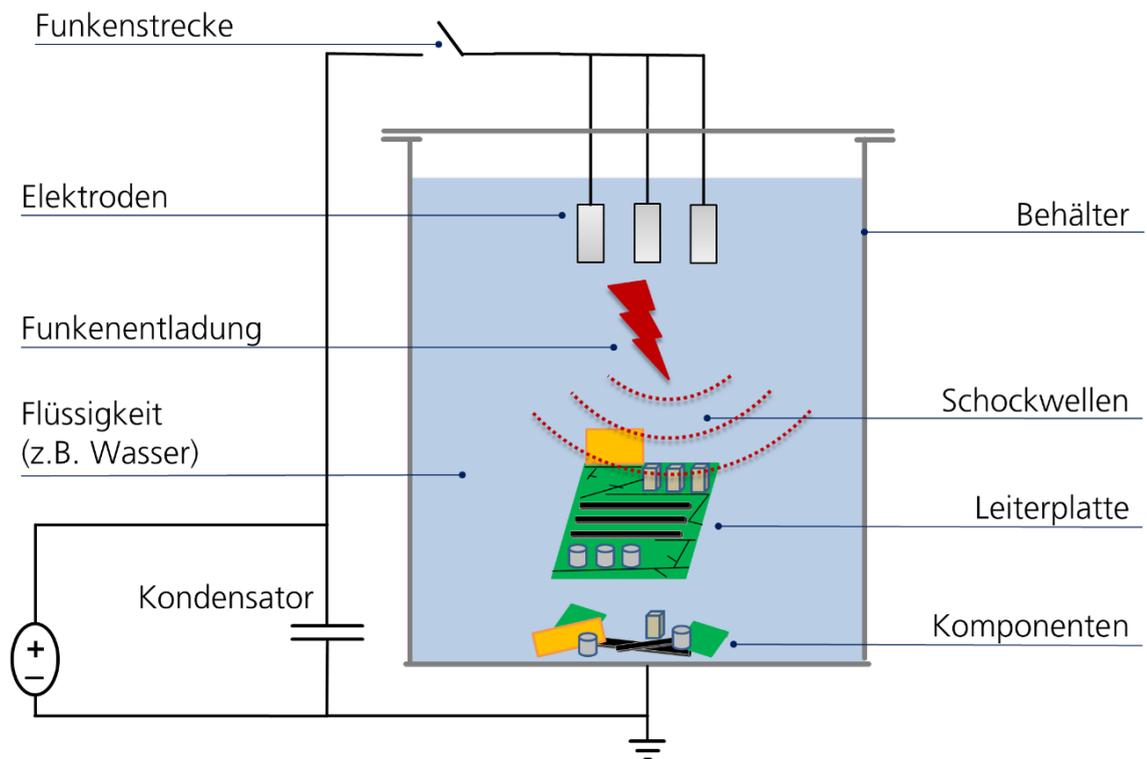


Abbildung 14: Prinzipielle Darstellung des EHZ-Verfahrens

Die Temperatur und der Druck innerhalb des Entladungskanals steigen schlagartig an und komprimieren das umliegende Medium (Wasser), wodurch starke Schockwellen entstehen und auf das zu zerkleinernde Material treffen. Das Material wird bei diesem Verfahren weit homogener als bei vergleichbaren mechanischen Zerkleinerungsverfahren, wie beispielsweise Mühlen oder Brechern, belastet. Als Folge der homogenen Krafteinwirkung auf das Material und einer Überlagerung/Inversion von Druckwellen innerhalb des Materials werden vor allem Phasengrenzen zwischen Materialien mit unterschiedlichen akustischen Eigenschaften belastet (Kontaktstellen von elektronischen Komponenten und Basismaterial der Leiterplatten). Durch das Versagen an den Kontaktflächen erfolgt eine materialelektive Separation. [Impulstec 2015], [Zange 2000]

Die Arbeitsspannung, mit der die Kondensatoren entladen werden, kann zwischen 30 und 40 kV variiert werden. Mit höheren Spannungen werden stärkere Schockwellen erzeugt; mit niedrigeren Spannungen lässt sich eine schonendere Zerkleinerung erreichen. Die Entladungsfrequenz lässt sich zwischen 1 und 4 Hz einstellen. Diese spielt eine untergeordnete Rolle bei der EHZ. Um die Hochspannungselektrik zu schonen, empfehlen sich Frequenzen zwischen 1 und 2 Hz. Durch die Wahl der Entladungsimpulse lässt sich der Zerkleinerungsgrad einstellen. Mit einer geringeren Anzahl lassen sich leicht ablösbare elektronische Komponenten abtrennen. Bei hohen Entladungsimpulszahlen kann das Basismaterial bis auf Glasfasern und Epoxidharzmatrix zerlegt werden. Die benötigten Impulszahlen müssen für jedes Material experimentell ermittelt werden. Materialzusammensetzung und Größe der zu zerkleinernden Objekte haben einen

großen Einfluss auf die benötigten Entladungsimpulse. Ein geeigneter Elektrodenabstand zum Material korreliert eng mit der Schütthöhe des Aufgabegutes und muss für die jeweilige Schütthöhe ermittelt werden.

Das Verfahren bietet gegenüber herkömmlichen Zerkleinerungsverfahren einige Vorteile:

- selektive Zerkleinerung von Verbundmaterialien entlang der Phasengrenzen
- keine Staubentwicklung durch die nasse Bearbeitung und damit weniger Kosten für die Sicherheitstechnik und Arbeitsschutz
- Mischungen von unterschiedlichen Materialien können in einem Durchgang verarbeitet werden
- Viele Komponenten werden durch die Behandlung nicht beschädigt und könnten wiederverwendet werden.

Erstes Ziel der selektiv wirkenden Elektrohydraulischen Zerkleinerung war es, die Leiterplatten so zu entstücken, dass alle Baugruppen der Leiterplatte mit möglichst wenigen Impulsen entfernt werden.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden insgesamt vier Zerkleinerungsversuche durchgeführt. Die Versuche wiederum sind in Intervalle unterteilt, nach denen die EHZ nach einer definierten Entladungsimpulszahl unterbrochen wurde und die Grafikkarten auf den Grad der Entstückung überprüft wurden. Nach jedem Versuch wurden Grafikkarten und entstückte elektronischen Bauteile händisch separiert und der Erfolg der selektiven Entstückung bewertet. Ist die Bauteilentstückung als vollständig bewertet worden, galt der Versuch als abgeschlossen. Abschließend wurde das gesamte Material in einem Trockenschrank getrocknet.



Abbildung 15: Selektive Entstückung von Leiterplatten mittels Elektrohydraulischer Zerkleinerung.

Ergebnisse der EHZ-Versuche

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Entstückung von Leiterplatten mittels EHZ.

Tabelle 3: Mittels EHZ durchgeführte Zerkleinerungsversuche.

	Input	Positionierung	Gesamtimpulszahl
Versuch 1	35 LP	hochkant	600
Versuch 2	6 LP	als Schüttgut	375
Versuch 3	35 halbe LP	als Schüttgut	375
Versuch 4	35 halbe LP	als Schüttgut	375

Im ersten Versuch dienten 35 Platinen als Versuchsmaterial. Positioniert wurden diese hochkant im Reaktor (s. Abbildung 16). Insgesamt wurden bei diesem ersten Durchlauf 600 Impulse eingesetzt.



Abbildung 16: Positionierung der Leiterplatten im Reaktor bei Versuch 1 (Quelle: IWKS 2020).

Bei der durchgeführten Zerkleinerung konnte beobachtet werden, dass der Grad der Zerkleinerung stark von Leiterplatte zu Leiterplatte variiert, da die in Elektrodennähe platzierten Leiterplatten stärker beansprucht werden, als Leiterplatten, die in einem größeren Abstand positioniert sind. Beispielhaft sind in den folgenden Abbildungen die nach einem Versuch vorliegenden vollständig entstückten Leiterplatten, unvollständig entstückten Leiterplatten und selektiv abgetrennten elektronischen Bauteile dargestellt:



Abbildung 17: Vollständig entstückte Leiterplatten aus Versuch 1 (Quelle: IWKS 2020).



Abbildung 18: Unvollständig entstückte Leiterplatten aus Versuch 1 (Quelle: IWKS 2020).



Abbildung 19: Elektronische Bauteile (Quelle: IWKS 2020).

Um der stark variierenden Zerkleinerung einzelner Leiterplatten aus Versuch 1 entgegenzuwirken, ist eine Bewegung der Leiterplatten im Zerkleinerungsbehälter nötig, so dass die Orientierung einzelner Leiterplatten zu den Elektroden variiert. Bei einer geringeren Menge an Leiterplatten im Behälter können sich die Leiterplatten freier bewegen. Daher dienten für Versuch 2 nur sechs Leiterplatten als Inputmaterial.

Für den dritten und vierten Versuch wurden 36 Leiterplatten halbiert, damit durch die kleineren Abmessungen eine bessere Durchmischung der Objekte stattfindet. Für Versuch 3 wurden die GPU-tragenden Platinenhälften verwendet, während für Versuch 4 die Platinenhälften ohne GPU als Input dienen.



Abbildung 20: Positionierung der Leiterplattenhälften mit GPU im Zerkleinerungsbehälter
(Quelle: IWKS 2020)

Diskussion der Zerkleinerungsuntersuchungen mittels EHZ

Alle auf den Leiterplatten vorhandenen elektronischen Bauteile lassen sich vollständig von der Leiterplatte lösen. Der Zeitpunkt der Ablösung ist nicht klar definiert. Dieser ist stark abhängig von Bauteilart und Position der Leiterplatte zur Schockwellenerzeugung. Große Bauteile, vor allem spröde GPUs und ICs werden oftmals beschädigt, bevor sich das Bauteil von der Leiterplatte löst. Diese Schädigung während der EHZ ist für die folgenden Sortierschritte kontraproduktiv, jedoch nicht zu verhindern.

AP 2.2 Automatisierte Sortierung (Fraunhofer IWKS)

Mit entstückten Leiterplatten und ihren Komponenten wurden anschließend Sortierversuche an unterschiedlichen physikalischen und sensorbasierten Aggregaten am IWKS durchgeführt. Ziel war die automatisierte Sortierung der unterschiedlichen Bauteile, um wertvolle und/oder kritische Metalle in unterschiedlichen Fraktionen anzureichern. Hierzu wurde zunächst die Eignung des Materials für eine Sortierung auf den verschiedenen Sortieraggregaten untersucht. Anschließend wurde auf Grundlage dieser Erkenntnisse ein Gesamtprozess aus der Kombination verschiedener Prozessschritte entwickelt.

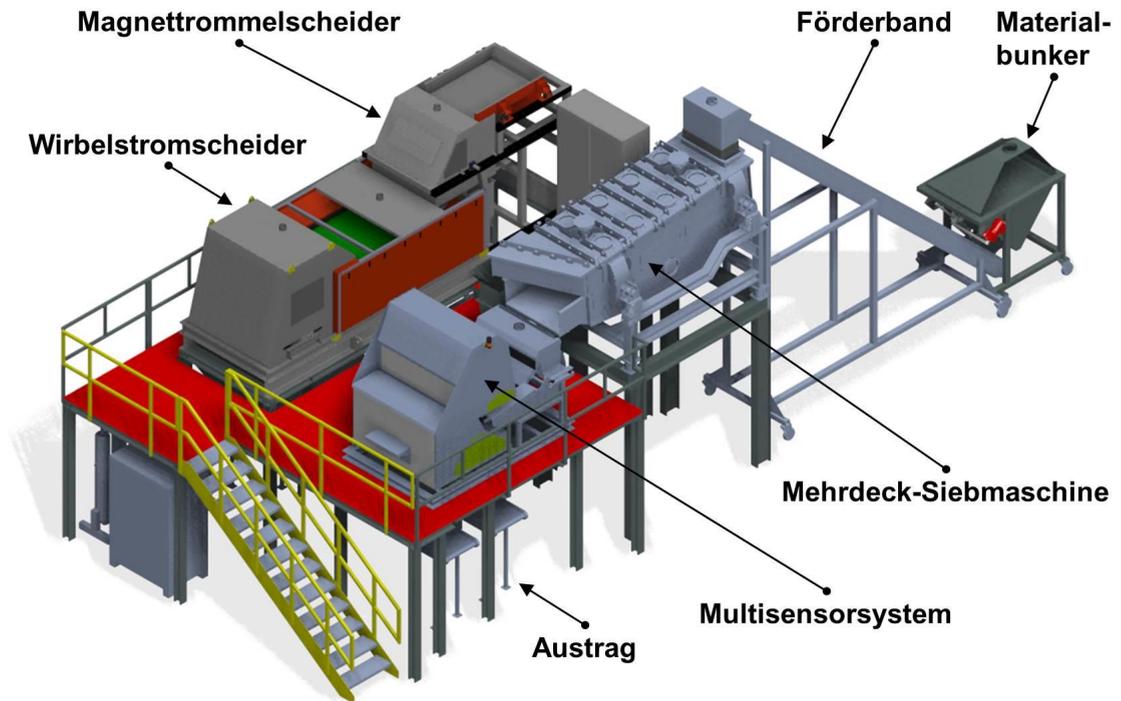


Abbildung 21: Sortieranlage des Fraunhofer IWKS

Abbildung 21 zeigt die modulare Sortieranlage des Fraunhofer IWKS. Diese ist ausgestattet mit mehreren Aggregaten zur Sortierung und Klassierung von Material.

Das zu sortierende Material wird aus einem Bunker mit Fördertechnik auf die verschiedenen Aggregate aufgegeben. Spannwellensieb für die Erzeugung eines spezifischen Korngrößenverhältnisses, unter Abscheidung von wählbarem Unter- und Überkorn, erlaubt die Vorkonditionierung für nachfolgende Sortierschritte. Magnet- und Wirbelstromscheidung werden für die Abscheidung von metallischen Partikeln eingesetzt. In einem sensorbasierten Sortieraggregat wird das Material in weitere Fraktionen aufgetrennt. Die Kombination der Aggregate kann dabei frei gewählt werden, um Unterschiede in der Reihenfolge sowie der Wiederholung einzelner Verfahrensschritte zu untersuchen. Die einzelnen Aggregate sind dabei frei konfigurierbar. Die Anlage ermöglicht Untersuchungen im Bereich weniger Gramm bis zu Sortierprozessen mehrerer Tonnen pro Tag.

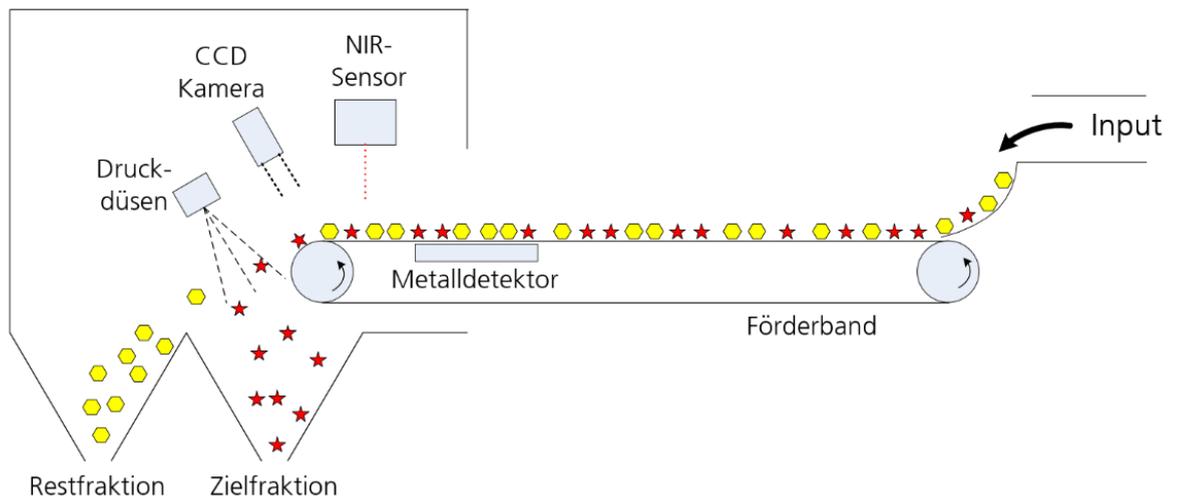


Abbildung 22: Prinzip der sensorbasierten Sortierung

In Abbildung 22 ist das Prinzip der sensorbasierten Sortierung dargestellt. Auf einer Arbeitsbreite von 1 m durchläuft das Material drei unterschiedliche Sensoren. Abhängig von der Sortierentscheidung fällt das Material am Ende des Transportbands entweder in eine erste Fraktion oder wird mit Hilfe von Druckluft in eine zweite Fraktion ausgeblasen. Das Sortieraggregat verfügt über einen Induktionssensor, eine optische CCD-Kamera zur Farb- und Formerkennung und eine hyperspektrale Nahinfrarot-Kamera (NIR). Mit Hilfe der drei Sensoren kann das Sortiergut nach Metallgehalten, Farben, Formen und Kunststoffsorten bzw. anderen IR-aktiven Bestandteilen getrennt werden. In der Auswerteelektronik werden die Informationen der Sensoren verknüpft, um zielgenau die gewünschten Objekte zu erkennen.

Klassierung

Um die prinzipielle Machbarkeit einer automatisierten Siebung der mittels EHZ entstückten Bauteile nachzuweisen, wurde zunächst eine Klassierung in einem händisch zu be-
ladenden Siebturm durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Massenanteile der Größenfraktionen nach der Siebung.

Größenklassen	Masse in g	Anteil
< 1 mm	15,29	7,7%
1 - 2 mm	12,86	6,5%
2 - 4 mm	27,22	13,7%
4 - 6,3 mm	30,09	15,2%
6,3 - 10 mm	24,27	12,2%
10 - 20 mm	25,59	12,9%
> 20 mm	63,05	31,8%

Die Fraktionen mit einer Partikelgröße zwischen 4 mm und 20 mm sollen im Rahmen des Projektes einer sensorbasierten Sortierung unterzogen werden, um festzustellen,

inwieweit sich diese Fraktionen in einzelne Bauteilklassen sortieren lassen. Die Fraktionen < 4 mm sind zu fein für eine sensorbasierte Sortierung und werden daher mit Hilfe einer Kombination aus Magnet- und Wirbelstromscheidung sortiert. Die Fraktion mit einer Partikelgröße über 20 mm (Abbildung 23) enthält ausschließlich Grafikprozessoren (GPUs) und besitzt damit einen hohen Goldanteil. Eine weitere Sortierung dieser Fraktion ist nicht notwendig. Zudem besitzt diese Fraktion den höchsten Masseanteil mit 31,8 %.



Abbildung 23: Siebfraction > 20 mm nach einer Siebung der Bauteile (Quelle: IWKS 2020).

Magnet- und Wirbelstromscheidung (Fraktionen < 4 mm)

Die Fraktionen < 4 mm wurden in einem kombinierten Prozess aus Magnetscheidung und Wirbelstromscheidung behandelt. Im ersten Schritt werden dabei die ferromagnetischen Partikel, vor allem Eisenmetalle, abgeschieden. Mittels eines starken magnetischen Wechselfeldes wird im zweiten Schritt des Prozesses ein Wirbelstrom in die verbliebenen Partikel induziert. Objekte mit einem günstigen Verhältnis von Leitfähigkeit zu Dichte, insbesondere Nichteisenmetalle, werden hierdurch vom Förderband abgestoßen und so von den nichtmetallischen Resten, wie Keramik und Kunststoffen, getrennt. Abbildung 24 zeigt Fraktionen von Eisenmetallen (links im Bild), Nichteisenmetallen (rechts im Bild) und Nichtmetallen (mittig im Bild). In Tabelle 5 sind die zugehörigen Massenanteile aufgelistet.



Abbildung 24: Ergebnis der Magnet- und Wirbelstromscheidung (Quelle: IWKS 2020).

Tabelle 5: Massen der Fraktionen nach der Magnet- und Wirbelstromscheidung.

Fraktion	Massenprozent
Eisenmetallfraktion	22,2 %
Nichteisenmetallfraktion	1,9 %
Nichtmetallfraktion	75,9 %

Die größte Fraktion nach der Magnet- und Wirbelstromscheidung stellt die Nichtmetallfraktion mit 75,9 Massenprozent dar. Tatsächlich sind in dieser Fraktion noch Metalle vorhanden, die jedoch nicht bzw. sehr schwach magnetisch sind und zu wenig Massenanteile an Nichteisenmetallen besitzen, sodass auch die Wirbelstromscheidung hier nicht zu einer Abtrennung führt. Magnetische Metalle konnten erfolgreich mit einem Massenanteil von 22,2% abgetrennt werden.

Da durch die EHZ-Behandlung Bauteile nicht nur von der Leiterplatte entstückt, sondern, vor allem große Bauteile, auch zerkleinert wurden, finden sich in der < 4 mm Fraktion Bruchstücke größerer Bauteile. Dieser Umstand macht eine Sortierung schwierig, da hierdurch nicht alle Bauteile einer bestimmten Größe durch die Siebung in eine Größenklasse fraktioniert werden konnten. Zudem ist die Erkennung beschädigter und zerkleinerter Bauteile mittels Sensorik schwieriger zu realisieren als die Erkennung kompletter, unbeschädigter Bauteile. Für bessere Sortierergebnisse war daher eine Optimierung des EHZ-Prozesses und der Sortierparameter nötig.

AP 2.3 Optimierung der EHZ- und Sortierparameter (Fraunhofer IWKS)

Viele der in AP 2.1 dargestellten elektronischen Bauteile und Platinen weisen Beschädigungen auf. Beispielsweise sind viele GPUs stark beschädigt worden (siehe Abbildung 25).

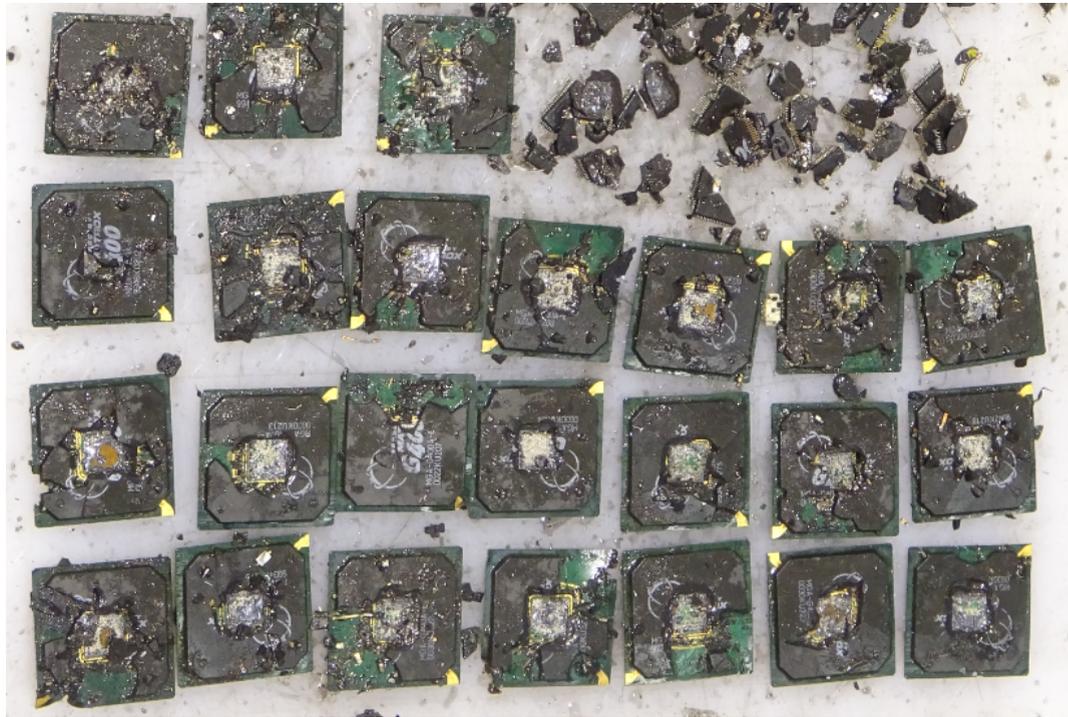


Abbildung 25: GPUs aus der EHZ vor der Prozessoptimierung (Quelle: IWKS 2020).

In mehreren Versuchsreihen wurden die Prozessparameter der EHZ auf den Anwendungsfall „Grafikkarten“ optimiert. Angepasst wurden:

- Abstand von Elektroden und Zerkleinerungsgut
- Reduktion der Inputmenge, um eine gute Durchmischung sicherzustellen
- Verwendung von Wasser mit geringerem elektrischem Leitwert
- Verwendung eines Einsatzes, um die Grafikkarten auszurichten und sie vor elektrischen Durchschlägen zu schützen.

Durch Anpassungen der Prozessparameter konnte eine deutlich schonendere Entstückung der Platinen realisiert werden. Die nach der Optimierung entstückten GPUs weisen weitaus weniger Beschädigungen auf (siehe Abbildung 26).



Abbildung 26: GPUs aus der EHZ nach der Prozessoptimierung (Quelle: IWKS 2021)

Das entstückte Basismaterial weist nach der EHZ-Prozessoptimierung ebenfalls weit weniger Beschädigungen auf, als die Versuche vor der Optimierung (siehe Abbildung 27).



Abbildung 27: Weitestgehend entstückte vorzerkleinerte Platinen (Quelle: IWKS 2021).

Entwickelte Sortierkaskade

Aufbauend auf den Weiterentwicklungen der EHZ-basierten Entstückung wurde der Sortierprozess für eine Anwendung auf unzerstörte elektronische Komponenten weiterentwickelt. Um eine ausreichende Menge für aussagekräftige Versuche zu erhalten, wurden zusätzlich 10 Leiterplatten manuell mittels Heizplatten von der TH Aschaffenburg entstückt.

Der weiterentwickelte Prozess nutzt eine Kombination aus Siebung, Magnet- und Wirbelstromscheidung sowie sensorbasierte Sortierverfahren (Abbildung 28).

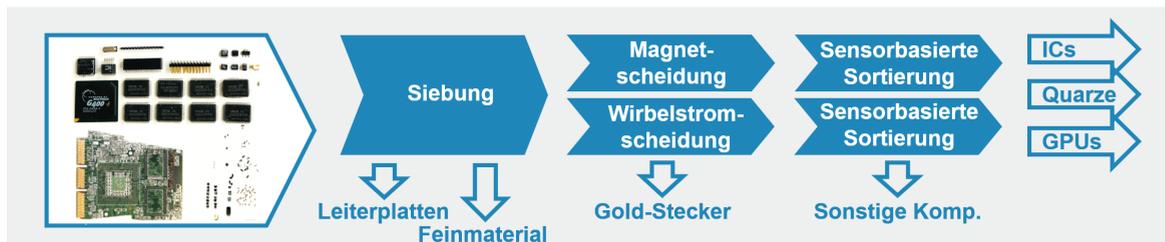


Abbildung 28: Ablauf und Produkte des entwickelten Prozesses zur Sortierung der entstückten elektronischen Bauteile

In einem ersten Schritt werden die abgelösten Komponenten von den weniger werthaltigen Resten separiert. Hierzu wird ein Spannwellensieb mit mehrstufigem Siebprozess eingesetzt (Abbildung 29).

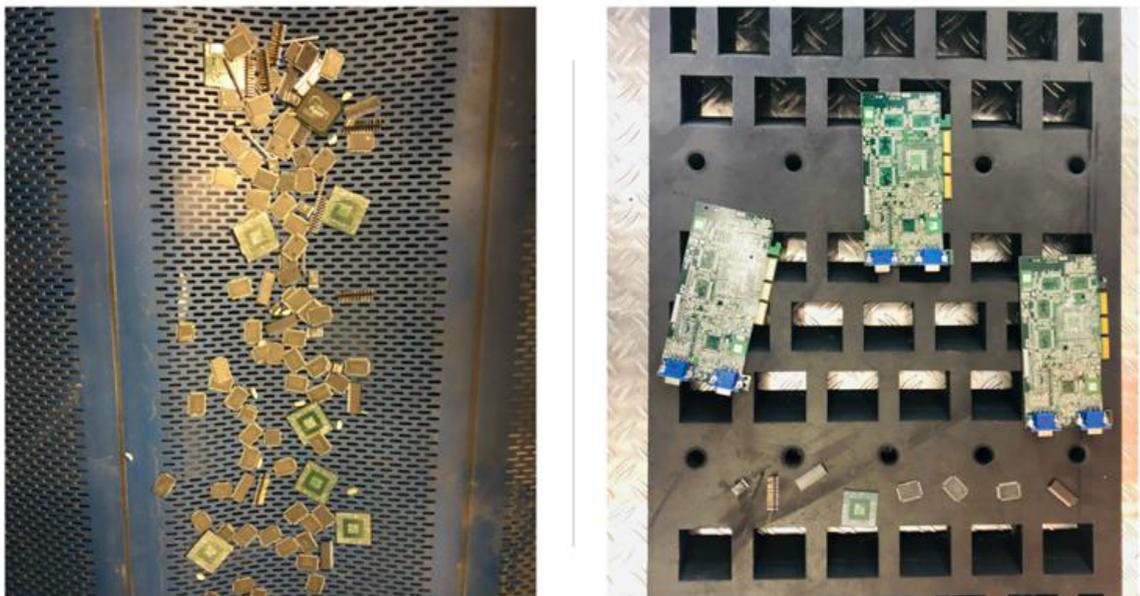


Abbildung 29: Größenvergleich der Komponenten und Leiterplatten auf der feinen und groben Siebstufe.

Zunächst werden mit < 3 mm alle zu feinen und damit für weitere Sortierung schlecht geeigneten Partikel abgeschieden. Das übrige Material durchläuft anschließend eine Siebstufe mit 50 mm Maschenweite. Hierbei werden das weitgehend von Komponenten

befreite Basismaterial und die abgelösten Komponenten separiert. Die Klassierung erfolgte in allen Durchgängen vollständig. Bei dem größeren Sieb fallen alle Komponenten außer den Leiterplatten (LP-Fraktion) durch das Sieb. Die kleinere Siebmatte teilt die elektronischen Komponenten dann in eine Grobfraktion und Feinfraktion. Die von Siebmatte 3 mm zurückgehaltene Grobfraktion ist ein Gemisch aus GPU, ICs verschiedener Größe, Steckerleisten, Quarzteilen etc. Fast alle wertvollen Bauteile sind in dieser Fraktion zu finden. Die Feinfraktion enthält die kleinen Widerstände, Kondensatoren sowie Lötpulver. Die Ergebnisse sind in Abbildung 30 dargestellt.



Abbildung 30: Ergebnis der Siebung (v.l.n.r.): Leiterplatten, Komponenten, Feinmaterial.

Die nun von Feinmaterial und Leiterplatten befreiten Komponenten durchlaufen eine Magnet- und Wirbelstromscheidung. Unter den Nichteisenmetallen (NE) finden sich GPUs und Spannungsregler. Von der Magnetscheidung in eine Eisenmetallfraktion (Fe) ausgetragen wurden Integrierte Schaltkreise und Quarze. Im Rest finden sich (vergoldete) Stecker und Goldpins. Letztere Fraktion kann direkt für eine Edelmetallgewinnung eingesetzt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 31 dargestellt.



Abbildung 31: Ergebnis der Wirbelstromscheidung (NE): GPUs + Spannungsregler, Magnetscheidung (Fe): ICs + Quarze, sowie Restfraktion (Stecker und Goldpins).

Die Sortiergenauigkeit der optimierten und anschließend dreifach durchgeführten Magnet- und Wirbelstromscheidung ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Sortiergenauigkeit der einzelnen Komponenten in die korrelierenden Fraktionen.

Fraktion	Komponente	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Durchschnittliche Sortiergenauigkeit
NE	GPU	100 %	100 %	100 %	100 %
	Spannungsregler	89 %	89 %	89 %	89 %
Fe	IC	97 %	100 %	100 %	99 %
	Quarz	100 %	100 %	100 %	100 %
Rest	Schwarzer Stecker	100 %	100 %	100 %	100 %
	Goldpins	100 %	100 %	100 %	100 %
	Längliche Steckerleisten	100 %	86 %	100 %	95 %
	Weißer Stecker	100 %	100 %	89 %	96 %

Zur Steigerung der Sortenreinheit wurde anschließend versucht, die Fe- und NE-Fraktion weiter in ihre einzelnen Komponenten zu sortieren. Hierzu wurde die sensorbasierte Sortierung eingesetzt. Mittels Sensoren werden charakteristische Eigenschaften der Objekte auf einem Förderband erfasst und anschließend ausgewertet. Entsprechen die Eigenschaften der gewählten Einstellung, so wird das Objekt mittels Druckluft aus seiner Wurfparabel am Ende des Förderbandes geworfen (Eject) und somit von den übrigen Objekten (Pass) separiert.

Analysen mittels induktiver Metallidentifikation zeigten keine robusten Unterschiede zwischen den Komponententypen, welche für Sortierung verwendet werden könnten. Zu kleine Abmessungen und zu verteilte Metallgehalte machten die Objekte für dieses Verfahren ungeeignet.

Analysen mittels Nahinfrarotspektroskopie (NIR) konnten ebenfalls keine verwertbaren charakteristischen Spektren ermitteln. Die Bauteile weisen vorwiegend schwarze Gehäuse auf, die die für die Charakterisierung benötigte Infrarotstrahlung absorbieren, wodurch kein Rückschluss auf das verwendete Material möglich ist. Aufgezeichnete Spektren zeigen lediglich die eingesetzte Strahlungsquelle, welche von den metallischen Elementen reflektiert wird (Abbildung 32).

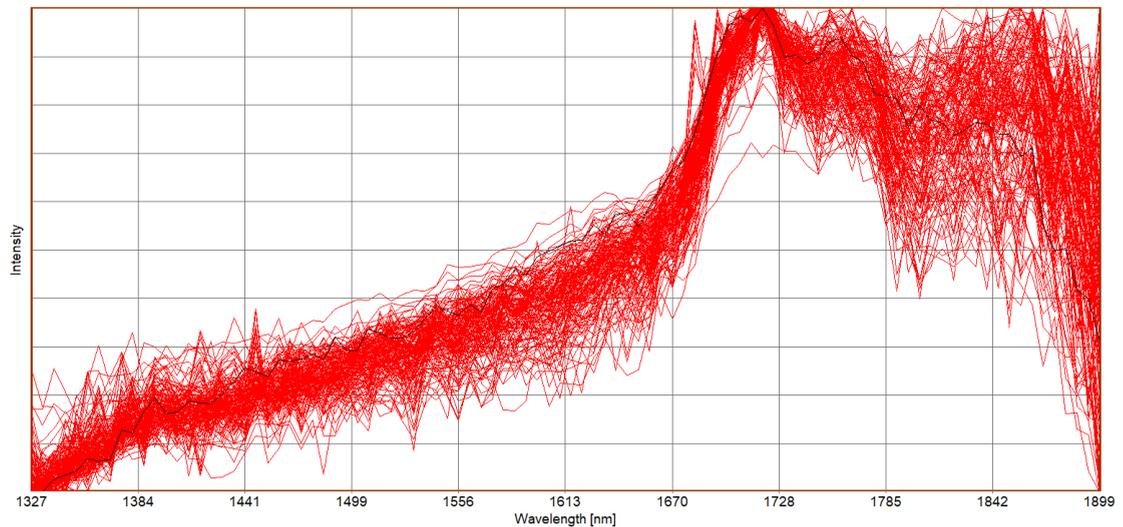


Abbildung 32: Überlagerte Spektren verschiedener elektronischer Komponenten.

Als drittes sensorbasiertes Verfahren wurde die Farb- und Formsortierung erprobt. Eine Farbsortierung war aufgrund der zuvor genannten weitgehend schwarzen und teilweise metallisch glänzenden Oberflächen nicht erfolgreich.

Eine Formsortierung wurde anschließend zugunsten einer Sortierung nach Größe der Komponenten angepasst. Hiermit konnte die Fe-Fraktion in drei Versuchsdurchläufen je zu 100 % in 75 ICs (Eject) und 7 Quarze (Pass) separiert werden (Abbildung 33).

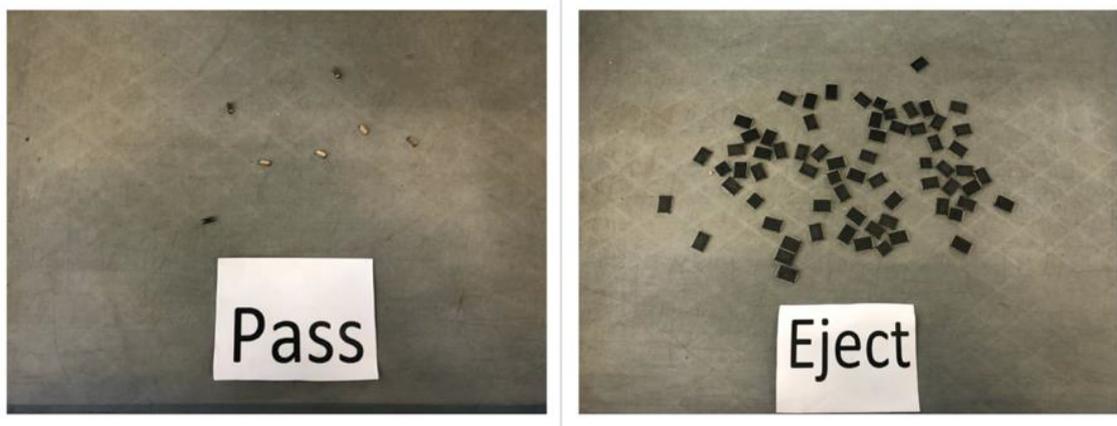


Abbildung 33: Ergebnis der sensorbasierten Sortierung nach Größe in Quarze (Pass) und ICs (Eject).

Die NE-Fraktion wurde ebenfalls entsprechend der Größenunterschiede zwischen den Komponenten sortiert. In der besten ermittelten Einstellung wurden stets alle 9 Spannungsregler in die Pass-Fraktion sortiert. In zwei von drei Versuchen fanden sich korrekterweise alle GPUs in der Eject-Fraktion. Nur in einem von drei Versuchen wurde eine GPU falsch sortiert (Abbildung 34).

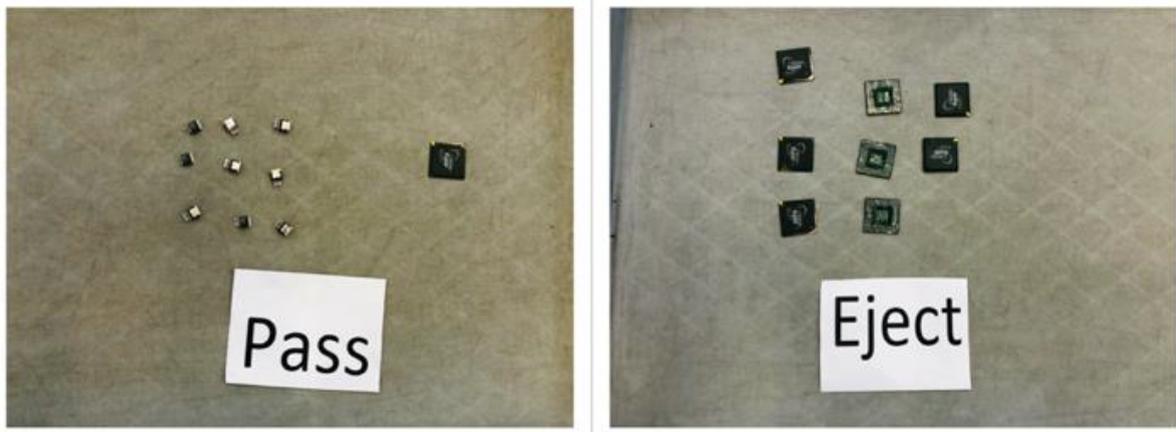


Abbildung 34: Ergebnis der sensorbasierten Sortierung nach Größe in Spannungsregler (Pass) und GPUs (Eject).

AP 3 Vergleich der Verfahren und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Technische Hochschule Aschaffenburg und Fraunhofer IWKS)

Beide Entstückungsverfahren wurden im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit verglichen. Die Verfahren sind flexibel zur Entstückung beliebiger Bauteilgruppen einsetzbar. Die Wahl der zu entstückenden Bauteile fällt abhängig von den zu recycelnden Werkstoffen aus und wird softwaremäßig implementiert. Zu den kritischen Rohstoffen im klassischen Elektronikschrott gehören: Gold (Kontakte, Bonddrähte), Germanium (Dioden und Transistoren), Beryllium (EMV-Kontaktfedern), Tantal (Kondensatoren), Seltene Erden (Magnetschalter, Elektromotoren). Die Evaluierung der Wirtschaftlichkeit der entwickelten Entstückungsverfahren belief sich im vorliegenden Projekt auf die Rückgewinnung von Tantalpentoxid aus Tantal-Kondensatoren.

a. Gewinnbarkeit versorgungskritischer Rohstoffe

Tantal kommt in der Natur nur in geringen Mengen vor. In der kontinentalen Erdkruste liegt der Tantalgehalt lediglich bei 2 ppm. Es tritt zudem nicht in reiner Form, sondern nur in Verbindungen wie z.B. Niob auf. Reines Tantal wird erst durch den Einsatz von aufwendigen chemischen Verfahren gewonnen.

Die weltweiten Tantal-Reserven werden laut USGS auf etwa 140.000 Tonnen geschätzt [USGS 2021]. 2016 betrug der weltweite Tantalbedarf 1.894 Tonnen, Deutschland importierte rund 126 Tonnen Tantal. Im Zuge der stetigen zunehmenden Digitalisierung in sämtlichen Lebensbereichen, von der industriellen Produktion über die Energieversorgung und das Transportwesen bis hin zur Bildung und Gesundheit, nimmt auch der weltweite Tantalbedarf stetig zu. Die jährliche Wachstumsrate wird auf 3,3% abgeschätzt [Damm 2018-1]. 2016 wurden ca. 32% des globalen Tantalbedarfs für die Herstellung von Tantal-Kondensatoren verwendet [Damm 2018-2]. Tantal-Kondensatoren enthalten ein aus hochreinem Tantalpentoxid (Ta_2O_5) bestehendes Dielektrikum [Damm 2018-2]. Sie finden u.a. aufgrund ihrer hohen Kapazität bei gleichzeitig geringer Größe zunehmend Anwendung in der Elektronikindustrie (Medizintechnik, Automobilindustrie). Ihre

hohe Spannungsfestigkeit erweist sich zudem in Steuereinheiten von Fahrzeugen als vorteilhaft [Kaczmarek 2018].

Sowohl die Europäische Union als auch die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) stuft das Material Tantal als kritischen bzw. als potentiell kritischeren Rohstoff ein [Schäfer 2021, DERA 2018].

Die primäre Gewinnung von Tantal erweist sich sowohl aus ökologischer als auch aus sozialer und ökonomischer Sicht als problematisch. Als Beispiel sei hierfür genannt, dass ca. 60% der Tantalminerale in artisanalen Bergwerken aus der Zentralafrikanischen Republik, der DR Kongo und aus Ruanda gefördert werden. Laut Berichten des Sicherheitsrates der Vereinten Nationen [UN 2020] findet dort der Abbau teilweise illegal statt, punktuell kann Kinderarbeit bestehen und/oder es werden nicht-staatliche Konfliktparteien finanziert. Ein weiterer kritischer Aspekt betrifft die Arbeitssicherheit. Minenunfälle mit tödlichen Unfällen treten relativ häufig auf, ohne dass sie von den Betreibern oder lokalen Behörden gemeldet werden [BGR 2021].

2016 deckte die sekundäre Gewinnung von Tantal ca. 20% des Tantalmarkts. Sie besteht bis dato hauptsächlich aus dem Recycling von Abfallprodukten, die bei der Kondensator- und der Pulverherstellung oder der Herstellung von Walzerzeugnissen entstehen sowie aus der Rückführung von Tantal aus Hartmetallen, Superlegierungen oder Sputtertargets. Die End-of-Life-Recyclingrate von Tantal betrug im Jahr 2016 weniger als 0,1% [Damm 2018 -2]. Das End-of-Life-Recycling ist insofern interessant, als die Konzentration von Tantal in den zu recycelnden Wertstoffen meist höher ist als in den Tantalminerale aus primären Quellen. Der typische Tantalgehalt in Tantalminerale aus Zentralafrika liegt bei etwa 100 – 500 g/t. Dagegen liegt der Tantalgehalt in Leiterplatten bei etwa 2400 g/t [BGR 2021]. Zudem weist das Recycling von Tantal gegenüber der primären Gewinnung generell eine deutlich bessere Energieeffizienz vor. Somit kann durch das Recycling die Erzeugung von Treibhausgasen sowie der Bedarf an Energie gesenkt werden [Schäfer2021].

Vor diesem Hintergrund wurde das Recycling-Verfahren im Hinblick auf die Rückgewinnung von Tantalpentoxid aus Tantal-Kondensatoren durch selektive Entstückung der Tantal-Kondensatoren von Leiterplatten aus Elektroschrott herangezogen.

b. Prozess- und Investitionskosten

Im Rahmen einer Kostenvergleichsrechnung wurden die anfallenden Investitions-, Wartungs- und Energiekosten für beide Entstückungsverfahren über einen Zeitraum von einem Jahr evaluiert. Die Daten beziehen sich auf die für das Projekt verwendeten Anlagen und Abläufe und deren entsprechenden Energiebedarf. Die Eckdaten der Kostenvergleichsrechnung sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7: Kostenvergleichsrechnung für beide im Rahmen des Projektes untersuchten Entstückungsverfahren

p.a.	Selektive Entstückung	Elektrohydraulische Zerkleinerung
Kapitalkosten		
Kalkulatorische Abschreibung	6.600,00 €	Geheimhaltung
Kalkulatorische Zinsen	1.320,00 €	
Summe Kapitalkosten	7.920,00 €	
Betriebskosten		
Instandhaltung	1.320,00 €	Geheimhaltung
Personalkosten	81.900,00 €	
Miete Anlage	1.200,00 €	
Miete Lager	240,00 €	
Energiekosten	5.238,75 €	
Wasserkosten	0 €	
Summe Betriebskosten	89.898,75 €	
Jährliche Gesamtkosten	97.818,75 €	

c. Vergleich der Verfahren

Die jährliche Maschinenkapazität wurde unter Berücksichtigung einer 90%igen Maschinenauslastung und von 95%igen Wartungs- und Ausfallkoeffizienten für beide Entstückungsverfahren auf 4893 Stunden evaluiert. Damit ließen sich für beide Verfahren die jährlichen Durchsätze und der jährliche Energiebedarf bestimmen. In Tabelle 8 sind die jährlichen Kenndaten beider Verfahren sowie die Werthaltigkeit von Tantalpentoxid (Ta_2O_5) aus Tantal-Kondensatoren und Gold (Au) aus integrierten Schaltkreisen (ICs) gegenübergestellt. Als Basis dienen hierfür 95 g schwere Leiterplatten à 15 Tantal-Kondensatoren und 5 goldhaltige ICs. Die Wirtschaftlichkeit des Leiterplattenrecyclings ist stark abhängig vom Materialwert der Wertstoffe. Zur Ermittlung der Werthaltigkeit dienten die Materialpreise von April 2022 [DERA 2022] d.h. ca. 226,43 €/kg für Ta_2O_5 und ca. 58.970,47 €/kg für Gold (Au) (Wechselkurs vom 22.05.2022: 1\$ = 0,9479 € [ECB 2022]). Die Energiekosten (Strom) basieren auf den Energiepreisen vom Januar 2022 [BDEW 2022] und belaufen sich auf 0,31 €/kWh.

Tabelle 8: Jährliche Kenndaten der Entstückungsverfahren. Bezug: Rohstoffpreise aus DERA, Preismonitor (April 2022) [DERA 2022], Energiekosten (Januar 2022) [BDEW 2022].

p.a.	Selektive Entstückung	Elektrohydraulische Zerkleinerung
Energiebedarf	16.705 kWh	1.055.103 kWh
Energiekosten	5.239 €	330.881 €
Gesamtkosten	97.819 €	420.136 €
Durchsatz	22 Tonnen Leiterplatten	100 Tonnen Leiterplatten
Werthaltigkeit Ta₂O₅	14.156 €	64.349 €
Werthaltigkeit Au	214.233 €	973.805 €

Für eine Tonne Leiterplatten belaufen sich die Gesamtkosten für die Entstückung der Leiterplatten im Labor- bzw. Technikumsmaßstab auf 4.446 € bei der selektiven Entstückung und auf 4.201 € bei der Elektrohydraulischen Zerkleinerung.

3 Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse

2019 fielen in Europa gut 12 Mio. Tonnen Elektronikschrott an, wobei die Recyclingquote in der Europäischen Union bei lediglich ca. 42% lag. Bis dato wird der recycelte Anteil an Elektronikschrott im großtechnischen Maßstab meist in mehrstufigen Zerkleinerungs- und Sortieranlagen behandelt. Geräte der IT werden im Wesentlichen manuell demontiert, um u.a. die hochwertig bestückten Leiterplatten zu separieren. Der Masseanteil von Leiterplatten am weltweiten Elektronikschrott liegt bei 3 bis 6 Gew.%. Leiterplatten werden in den herkömmlichen Recyclingvorgängen zunächst zerkleinert, um Aluminium und Eisenmetalle abzuscheiden. Das übrige Granulat gelangt schließlich in Sekundärhütten, in denen mittels Elektrolyse und hydro- oder pyrometallurgischer Prozesse Kupfer und Edelmetalle gewonnen werden. Eine Rückgewinnung von versorgungskritischen Metallen aus der Bestückung wie Tantal, Germanium oder Seltene Erden erfolgt i.d.R. nicht.

Die entwickelten Entstückungsverfahren zielen darauf ab, komplette Bauteile aus den Leiterplatten zu entfernen. Ziel dabei ist die Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen, die bisher bei herkömmlichen Recyclingverfahren in die Schlacke übergehen, als Abfallprodukte gelten und nicht weiterverwertet werden. Beispielhaft hierfür wurde die Entstückung von Ta-Kondensatoren zur Rückgewinnung von Ta_2O_5 betrachtet.

Der Vorteil der beiden Entstückungsprozesse liegt in deren Flexibilität. Eine Umstellung der Entstückung auf beliebige Bauteilgruppen der Leiterplatten sowie ein Hochskalieren auf industriellen Maßstab lassen sich ohne erheblichen Aufwand umsetzen. Die industrielle Umsetzung der entwickelten Verfahren könnte einen wesentlichen Beitrag in der Beschaffung anthropogener Lager für wertvolle Stoffe - darunter Tantal - leisten, die in Deutschland nicht oder nicht mehr aus geologischen Reserven gewinnbar sind. Insbesondere ist die bayerische Industrie auf eine zuverlässige Rohstoffversorgung angewiesen. Die entwickelten Verfahren stellen Möglichkeiten dar, den Anteil der Sekundärrohstoffen in Bayern und in Deutschland zu steigern, den Importbedarf zu senken, und damit die Versorgungssicherheit Deutschlands zu erhöhen. Mit anderen Worten unterstützen diese Möglichkeiten die Rohstoffstrategie vom Januar 2020 der Bundesregierung, welche das Ziel der nachhaltigen Rohstoffversorgungssicherheit Deutschlands verfolgt. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft.

Für die industrielle Umsetzung der selektiven Entstückung bietet es sich an, die beiden bislang getrennten Stationen zur Erkennung und zur Entstückung miteinander zu kombinieren. Dabei könnte die zu recycelnde Leiterplatte auf einem Förderband liegen, mit dessen Hilfe sie von einer Station zur anderen transportiert werden würde. Zur Optimierung der Prozessdauer würde der Aufheizvorgang zum Aufschmelzen der Lötverbindungen parallel zur Bearbeitung weiterer Platinen erfolgen. Zur Erhöhung der Zeit- und der Energieeffizienz sollte zudem der Heizvorgang in einem geschlossenen Raum stattfinden.

Das Erkennungsverfahren könnte zudem durch eine Echtzeitanalyse des Wertstoffgehalts ergänzt werden. Dabei würde ein Softwareprogramm implementiert werden, welches die Menge

und den Materialwert eines Wertstoffs (oder mehrerer Wertstoffe) während der Verarbeitung der Erkennungsdaten ermittelt. Damit könnten die Wirtschaftlichkeit des Leiterplattenrecyclings in situ evaluiert werden und eine automatisierte Sortierung der Leiterplatten nach erzieltm Gewinn zum entsprechenden Recyclingverfahren erfolgen.

Neben dem wirtschaftlichen Aspekt zeichnen sich weitere ökologische Vorteile bei der Rückgewinnung von Bauteilen aus End-of-Life-Leiterplatten. Letztere beinhalten nicht zu vernachlässigbare Mengen an toxischen Metallen wie Cadmium, Quecksilber, Chrom sowie organische Komponenten wie bromierte Flammschutzmittel oder Tetrabrombisphenol A. Beim Verbrennen von komplett bestückten Leiterplatten werden Schadstoffe wie HBr und CO in die Atmosphäre freigesetzt und somit die Umwelt belastet. Eine selektive Bauteilentstückung könnte schadstoffhaltige Bauteile von den Leiterplatten entfernen, um diese als Sonderabfall entsorgen und recyceln zu können, was die Umweltbelastung durch das Verbrennen von Leiterplatten reduzieren würde.

Bezüglich des Arbeitsschrittes der Bauteilerkennung fiel den Projektpartnern auf wissenschaftlicher Ebene eine jüngste Publikation von Lu et al. [Lu 2022] aus der Shanghai Jiao Tong University in China auf, in der über die Entwicklung eines automatisierten Sortiersystems für entstückte Bauteile berichtet wird. Die Sortierung der Bauteile in spezifischen Kategorien ist dabei mehrstufig. Sie basiert auf einer automatisierten Bilderkennung, bei der der YOLOv3-Algorithmus zur Bauteilerkennung verwendet wird. Wie beim Recyclingverfahren der THAB dient die darin beschriebene Bilderkennung der Ermittlung der Bauteilposition. Unterschied hierbei ist, dass die Bauteile lose auf einem Förderband liegen. Eine speicherprogrammierbare Steuerung empfängt die ermittelten Informationen der Kategorisierung und steuert ein parallel angeordnetes Sortiersystem, welches die Bauteile mechanisch in verschiedenen parallel angeordneten Behältern einsortiert (Durchsatz: 1875 Bauteile pro Stunde). Tabelle 9 stellt den Vergleich der Kenndaten der Bauteilerkennung von Lu et al. [Lu 2022] und derjenigen der THAB. Vergleichbare Ergebnisse werden erzielt. Die um den Faktor 2,6 geringere Erkennungszeit der THAB geht mit einer im Mittel um 3% geringeren Erkennungsrate einher. Bei Lu et al. [Lu 2022] wird lediglich das Sortierverfahren der bereits von der Leiterplatte entfernten Bauteilen betrachtet. Es liegen keine Angaben zum Entstückungsverfahren vor. Daher lassen sich die beiden Recyclingverfahren nur bedingt vergleichen. Ein Vergleich der Durchsätze ist nicht möglich.

Tabelle 9: Vergleich der Erkennungszeit und -rate der Bauteilerkennung des selektiven Entstückungsverfahrens der THAB und der Sortierung entstückter Bauteile von Lu et al.

	Selektive Entstückung IRVE (THAB) YOLOv4	Sortierung entstückter Bauteile [Lu 2022] YOLOv3
Erkennungszeit	30 ms/Bild	80 ms/Bild
Erkennungsrate	90 – 93 %	90 – 98 %

Die sensorbasierte Sortieranlage am Fraunhofer IWKS befindet sich mit allen Teilprozessen (Siebung, Magnetscheidung, Wirbelstromscheidung und sensorbasierte Sortierung) bereits im Industriemaßstab und ermöglicht mit einer Bandbreite von 1 m die Sortierung von über einer Tonne Leiterplattenmaterial pro Stunde. Die Sortiergenauigkeit für die ausgewählten Bauteile

lag bei 89 – 100 %. Die Erkennungszeit der sensorbasierten Sortierung ist je nach Sensorik unterschiedlich, liegt aber stets in einem Bereich von unter 30 ms. Die Zahlenwerte lassen sich an dieser Stelle nicht eins zu eins mit der Bilderkennung vergleichen, da die Bilderkennung mehr Möglichkeiten bietet. So ließe sich über einen Bilderkennungsalgorithmus beispielsweise automatisiert feststellen, ob ein Bauteil einen bestimmten Schriftzug enthält und dieses gezielt aussortieren. Bei der Sortiergeschwindigkeit bzw. dem Durchsatz liegt die Anlage mit etwa 5.000 Jahrestonnen aufgrund des industriellen Maßstabs und der einfacheren Bildauswertung weit vor den hier vorgestellten bildverarbeitenden Verfahren.

Im Rahmen des IRVE-Projektes wurde ein Prozess zur Sortierung der elektronischen Bauteile wie GPUs und ICs mit Hilfe der modularen Sortieranlage entwickelt. Es ist sinnvoll, schon am Anfang durch Siebung die entstückten Leiterplatten samt ihren Komponenten bei 50 mm und 3 mm zu klassieren, um das Basismaterial, Lötmittelpartikel und Abriebpulver auszutragen. Die werthaltigen Komponenten wie GPUs und ICs werden durch Siebung somit für nachgeschaltete Sortierverfahren gesammelt und aufkonzentriert. m das Sortierergebnis zu verbessern, ist es empfehlenswert, ein enges Sieb zu benutzen, um die Abriebpulver von den kleineren Komponenten wie z.B. Widerstände trennen zu können.

Die experimentellen Ergebnisse der Magnet- und Wirbelstromsortierung von elektronischen Komponenten zeigen, dass die Bauteile in eine NE-Fraktion, die hauptsächlich aus GPUs besteht, eine Fe-Fraktion, die hauptsächlich aus ICs besteht, und eine Rest-Fraktion, die hauptsächlich aus Steckerleisten besteht, unterteilt werden können. Alle drei Fraktionen enthalten goldhaltige Komponenten. Obwohl sich einige längliche Komponenten in einem Vorversuch als leicht magnetisch zeigten, wurde in der Prozessentwicklung festgestellt, dass sie nicht von der Magnetwalze angezogen wurden. Gründe hierfür könnten unzureichende Fläche sowie dominierende Kunststoffanteile sein.

Durch Anpassung der Formparameter bei der sensorbasierten Sortierung nach Form konnte bei der Ausschleußung von GPUs ein gutes Sortierergebnis erzielt werden. Bei der Trennung der in der Fe-Fraktion befindlichen ICs und kleinen Quarzen konnten bei allen Versuchen bei geeigneten Formparametereinstellungen sortenreine Ergebnisse erzielt werden.

Das Ergebnis hat gezeigt, dass es sich um einen zuverlässigen Prozess zur Sortierung hochwertiger Komponenten handelt, mit der die GPUs und ICs sortiert werden können. In den Versuchen konnten fast alle Zielobjekte mit signifikanten Formmerkmalen erkannt und anschließend getrennt werden. Nach der Siebung und der Magnet- und Wirbelstromscheidung konnte die Sortiereffizienz der Zielobjekte durch den Einsatz optischer sensorgestützter Sortiertechnik weiter optimiert werden.

4 Praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse und Darstellung der Kooperation mit Wirtschaftspartnern

Beide Verfahren stellen neue Perspektiven in der Rückgewinnung versorgungskritischer Rohstoffe wie Seltene Erden und Metalle (Tantal...) auf. Sie bieten Möglichkeiten dar, den Anteil der Sekundärrohstoffe in Deutschland zu steigern, und verfolgen damit die Rohstoffstrategie vom Januar 2020 der Bundesregierung zur Gewährung der nachhaltigen Rohstoffversorgungssicherheit Deutschlands.

Mit diesem Projekt festigt die Technische Hochschule Aschaffenburg ihre regionale, bayerische und internationale Reputation. Das IWKS generiert mit einem neuen umweltfreundlichen Aufbereitungsverfahren einen technologischen Vorsprung und eine politische Vorreiterrolle Bayerns. Für die beteiligten Partner ergeben sich ein Wissens- und Erfahrungszuwachs, der aus eigener Anstrengung nicht hätte erreicht werden können. Damit kann mit innovativen Verfahren und Produkten nicht nur der bayerische Standort Untermain gesichert werden, sondern auch das kontinuierliche Wachstum fortgesetzt und zusätzliche Arbeitsplätze geschaffen werden.

Die entwickelten Recyclingverfahren bieten zudem insbesondere den Firmen für Chemie und Materialtechnologien des Rhein-Main-Gebiets innovative Grundlagen zu neuen Expansionsmöglichkeiten an.

Kooperation mit Partnern aus der Wirtschaft

Der Kooperationspartner MAIREC Edelmetallgesellschaft mbH stellte für das Projekt 200 gleichartige Leiterplatten für Tests zur Verfügung. Dabei handelte es sich um alte Grafikkarten, die mehrere von den Projektpartnern als kritisch angesehene Rohstoffe beinhalten. Weiterhin konnten durch mehrere Meetings und einer Vor-Ort-Besichtigung Optimierungs-Strategien für die Entstückung der Platinen entwickelt werden. Der Industriepartner MAIREC begleitete die Untersuchungen zur Entstückung von Leiterplatten mithilfe beider Methoden (AP1 und AP2). MAIREC unterstützte die jeweiligen Optimierungen der Verfahren (AP 1.3 und AP 2.3) durch Einschätzung der Qualitätsverbesserung bzw. -verschlechterung der erhaltenen Fraktionen.

Mit der Firma Sesotec wurden Maßnahmen besprochen, um von den Leiterplatten entstückte Bauteile, die entweder einen besonderen Wert aufweisen oder im Gegenteil einen geringen Wert aufweisen und somit die Gesamtmasse unnötig erhöhen, durch sensorgestützte Sortierung entfernen zu können. Das IWKS arbeitete daher mit Sesotec an Möglichkeiten, die Daten aus den Sortierprozessen (Farbkamera, Metalldetektor) besser auszuwerten und die Sortierung durch geschickte Datenverarbeitung optimieren zu können. Der Industriepartner Sesotec unterstützte u.a. bei der Optimierung der Sortierparameter (AP 2.3), beispielsweise die Feineinstellung der verwendeten Sensoren, Auswahl der geeigneten Siebgrößen, und bei der Optimierung der Software.

Weiterhin konnte im Laufe des Projektes die Firma HB Systems GmbH als weiterer Kooperationspartner aus der Wirtschaft für das Forschungsprojekt gewonnen werden. HB Systems unterstützte die THAB in den Bereichen der Automatisierungstechnik und der Optimierung der

Entstückungsanlage. Insbesondere wurden die Werthaltigkeit und damit die ökonomische Relevanz einzelner elektronischer Bauteile diskutiert. Der Industriepartner HB Systems unterstütze ebenfalls bei der Optimierung der beiden Verfahren (AP 1.3 und AP 2.3). Schwerpunkte waren dabei die mechanischen Aufbauten und Komponenten (z.B. Auslegung diverser Anbauteile), sowie verfahrenstechnische Aspekte (z.B. optimierte Fahrwege des eingesetzten Portalroboters).

5 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts

Fraunhofer IWKS, „Neues Forschungsprojekt für innovative Recyclingverfahren von Elektroschrott gestartet“, Presseinformation (2019) <https://www.iwks.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/pressemitteilungen-2019/start-projekt-irve.html> (letzter Zugriff 21.06.2022)

Projektverbund ForCYCLE II - Teilprojekt 10, Innovative Recyclingverfahren für Elektroschrott – IRVE, <https://www.youtube.com/watch?v=kGp1KF8sVH8> (letzter Zugriff 21.06.2022)

6 Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern und im Projektverbund

Zusammenarbeit im Projektverbund

Im Rahmen des Projektes fand eine Kooperation zwischen der Technischen Hochschule Aschaffenburg (THAB) und der Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS statt.

Die Bereiche der Wertstoffkreisläufe und effizienter sowie nachhaltiger Ressourcenstrategien bilden den Schwerpunkt der Forschungsarbeiten des Fraunhofer IWKS. Ziel der Forschungsarbeiten ist es, eine geschlossene Kreislaufwirtschaft zu etablieren und Abfälle zu vermeiden, indem wertvolle Rohstoffe zurückgewonnen und wiederverwertet oder aber durch nachhaltige Alternativen ersetzt werden.

Die Zusammenarbeit der beiden Kooperationspartner erfolgte durch regelmäßige Meetings, bei denen die jeweils aktuellen Zwischenstände und Forschungsergebnisse der beiden Ansätze abgeglichen wurden. Weiterhin wurden mehrmals Stoffproben ausgetauscht, um die Varianz der untersuchten Materialien zu erhöhen und die Verfahren besser miteinander vergleichen zu können. Synergien durch unterschiedliche technische Ausstattungen konnten genutzt werden.

7 Zusammenfassung

Die entwickelten Verfahren zum Recycling von Leiterplatten bieten vielversprechende Möglichkeiten im Hinblick auf das angestrebte Ziel der Bundesregierung einer nachhaltigen Rohstoffversorgungssicherheit Deutschlands. Ihr Einsatz könnte dazu beitragen, den Anteil der Sekundärrohstoffe für den Elektronik-Sektor in Deutschland zu steigern.

Beide Projektgruppen haben das von ihnen vorgeschlagene Entstückungsverfahren optimiert. Die TH Aschaffenburg hat sich neben der Optimierung der Bauteilerkennung mit der gezielten Entstückung der Bauteile beschäftigt. Dafür wurden mehrere geeignete Verfahren evaluiert und miteinander verglichen. Mit dem optimierten Verfahren konnte der Durchsatz von ursprünglich 12,23 Tonnen auf 21,94 Tonnen Leiterplatten (Faktor 1,8) im Vergleich zum Projektbeginn gesteigert werden. Dieser ließe sich bei der industriellen Umsetzung durch Anpassungen und Serienreifmachung weiter steigern.

Die Fraunhofer-Einrichtung IWKS hat weitere mögliche Verfahren zur automatischen Sortierung evaluiert, um abschließend die Prozessparameter der EHZ und der Sortieranlage aufeinander abzustimmen. Dabei stand besonders die Verbesserung der sensorgestützten Sortierung durch Datenauswertung im Vergleich zu klassischen Verfahren (Siebung) im Vordergrund.

Der technische und wirtschaftliche Vergleich der beiden Verfahren „Selektive Entstückung“ und „Entstückung mittels selektiver Zerkleinerung mit nachfolgender sensorbasierter Sortierung“ zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit des Leiterplattenrecyclings stark vom Materialwert der Wertstoffe abhängt. Neben dem ökonomischen Aspekt sind ebenfalls die sozialen und ökologischen Vorteile im Vergleich zur Primärgewinnung und -verwendung zu berücksichtigen. Die Recyclingverfahren können Ansätze für die Nachhaltigkeits- und Rohstoffstrategie der Bundesrepublik Deutschlands darstellen. Insbesondere ist hier auf das Ziel für nachhaltige Entwicklung „dauerhaftes, inklusives und nachhaltiges Wirtschaftswachstum, produktive Vollbeschäftigung und menschenwürdige Arbeit für alle fördern“ verwiesen.

8 Ausblick

Gekennzeichnet durch ihre hohe Flexibilität lässt sich ein Hochskalieren der beiden entwickelten Entstückungsverfahren auf industrielle Ebene einfach umsetzen. Die heterogene Leiterplattenbeschaffenheiten erfordern jedoch unterschiedliche Strategien. Eine Fusionierung der beiden Verfahren könnte dabei Abhilfe schaffen. Die optische Vorerkennung zur Bauteil-Identifikation mit anschließender Leiterplatten-Sortierung könnte als Vorstufe einer kompletten Leiterplattenentstückung mittels elektrohydraulischer Zerkleinerung dienen.

Durch die dynamische Entwicklung sich stetig verbessernder neuronaler Netze ergeben sich stets vielversprechende Möglichkeiten zur Steigerung der Performance des Erkennungsverfahrens. Eine Evaluierung und Implementierung neuronaler Netze neuer Generationen wird daher stets empfohlen. Auch eine Erweiterung der Bild- und Bauteildatenbank kann die Performance der Bauteilerkennung verbessern.

Das Verfahren der selektiven Entstückung könnte aufgrund der starken Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit vom Materialwert der Wertstoffe und dessen dynamischen Fluktuationen mit einer In-situ-Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des Leiterplattenrecyclings computergestützt erweitert werden. Ein Softwareprogramm könnte bei der Verarbeitung der Erkennungsdaten implementiert werden, um die Menge und den Materialwert der Wertstoffe auf der Leiterplatte automatisiert zu ermitteln. Damit könnten die Leiterplatten während des Entstückungsprozesses nach Wirtschaftlichkeitsfaktoren sortiert werden.

Weiteres Optimierungspotential betrifft die Bauteildetektion. Durch Erfassung weiterer Sensordaten (3D-Daten, Daten aus Röntgen- und weiteren Analysen) und Sensordatenfusion könnte die Sortierung der Leiterplatten effektiver und genauer werden. Zum Beispiel könnte durch Einsatz der Röntgenfluoreszenzanalyse die Elementzusammensetzung der Bauteile ermittelt werden. Auf Basis dieser Information könnten die Leiterplatten entsprechend der enthaltenen Wertstoffe in verschiedenen Kategorien klassifiziert und sortiert werden.

Bei den durchgeführten EHZ-Versuchen waren nach dem Prozess vereinzelt Bauteile auf den Leiterplatten verblieben. Durch weitere Untersuchungen und Prozessoptimierungen ist nach derzeitigem Erkenntnisstand eine nahezu 100%ige Entstückung der Leiterplatten erreichbar. Hierbei spielt die Positionierung der Leiterplatten zu den Elektroden eine entscheidende Rolle.

Die Umsetzung der geschilderten Konzepte würde die Effizienz der im Projekt entwickelten Leiterplatten-Recycling-Verfahren signifikant steigern.

Die Entstückkosten für beide Verfahren belaufen sich jeweils auf über 4000 Euro. Für einen wirtschaftlichen Betrieb müssen diese Kosten gesenkt werden. Durch ein Upscaling der Prozesse können die Prozesskosten gesenkt und Durchsätze erhöht werden.

Literaturverzeichnis

Belz 2021

Belz, S.: „Evaluierung faltender neuronaler Netze zur Klassifikation wertstoffreicher Elektronikkomponenten“, Masterarbeit, Technische Hochschule Aschaffenburg (2021)

BDEW 2022

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW): „BDEW-Strompreisanalyse Januar 2022“, [Online]. Available: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/> (letzter Zugriff 24.03.2022)

Bochkovskiy 2020

Bochkovskiy, A.; Wang, C.-Y.; Liao, H.-Y. M.: YOLOv4: „Optimal Speed and Accuracy of Object Detection“, online verfügbar unter <https://arxiv.org/abs/2004.10934v1>, zuletzt geprüft am 17.06.2021

BGR 2021

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, „Tantal Informationen zur Nachhaltigkeit“, März 2021. [Online]. Available: https://www.geozentrum-hannover.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/tantal.pdf?__blob=publicationFile&v=2. [Zugriff am 25 August 2021].

Damm 2018-1

Damm, S.: „Rohstoffrisikobewertung Tantal“, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin (2018) Available: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/industrieworkshop_tantal_vortrag_Damm.pdf;jsessionid=10201BA6A3E2633F33E42310BC6329FC.2_cid321?__blob=publicationFile&v=4 (letzter Zugriff 20.05.2022)

Damm 2018 -2

Damm, S.: „Rohstoffrisikobewertung – Tantal – DERA Rohstoffinformationen 31,“ 2018. [Online]. Available: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-31.pdf?__blob=publicationFile&v=4. (letzter Zugriff 20.05.2022).

DERA 2018

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): „Rohstoffrisikobewertung Tantal“. 2018 [Online]. Available: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/industrieworkshop_tantal_vortrag,%20Damm.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (letzter Zugriff 04.07.2021)

DERA 2022

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): „Preismonitor“, Februar 2022. [Online]. Available: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/Monitore/2022/02-22/2022-02-preismonitor.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (letzter Zugriff 24.03.2022)

ECB 2022

European Central Bank: „US dollar (USD)“, 22.05.2022. [Online]. Available: https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html (letzter Zugriff 22.05.2022)

EU 2022

European Union: „Critical raw materials“, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en (letzter Zugriff 24.03.2022)

Han 2015

Yosep Han; Seungsoo Park; Seongmin Kim; Jaikoo Park. (2015): „Apperatus for electronic component disassembly from printed circuit board assembly in e-wastes“. In: International Journal of Mineral Processing, S. 11 - 15

Herchenbach 2013

D. Herchenbach; W.Li; M.Breier. (2013): „Segmentation and Classification of THCs on PCBAs“. In: 11th Int. Conf. On Industrial Informatics, S. 59 – 64

Hesch 2015

H.-X. Hesch: „Ressourcenpotentiale, Sortierkriterien und energieeffiziente Aufbereitungsverfahren für elektronische Altgeräte (EAG)“, Masterarbeit, Hochschule Aschaffenburg (2015)

Impulstec 2015

Firma Impulstec, „Die elektrohydraulische Zerkleinerungstechnologie,“ Dresden, 2015.

Kaczmarek 2018

Kaczmarek, I., Cymorek, C.: „Tendenzen der Tantalmärkte“, DERA Industrieworkshop Tantal, Berlin (2018)

Kern 2018

M. Kern: „Evaluierung der großtechnischen Umsetzung und Energiebedarfsanalyse einer neuartigen Entstückungsanlage“, Masterarbeit, Hochschule Aschaffenburg (2018)

Knoth 2001

R. Knoth; M. Hoffmann; B. Kopacek; P. Kopacek. (2001): „Intelligent Disassembly of Electr(on)ic Equipment“. In: Second Int. Symp. On Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. S. 557 – 561

Kolroser 2017

Verena Kolroser, Harald Grill (2017): „WKÖ-Analyse: Neue Liste der kritischen Rohstoffe der EU und Implikationen für die Wirtschaft“, <https://news.wko.at/news/oesterreich/wko-analyse-liste-kritischer-rohstoffe.html> (letzter Zugriff 05.09.2022)

Kopacek 2013

Kopacek et al. (2013): „Wiedergewinnung von Indium, Gallium, Yttrium und Europium u.a. aus Photovoltaik-Anlagen, LED-Lampen und anderem Elektroschrott“, Projekt „RECLAIM“, TU Wien, Laufzeit: 01.01.2013 – 31.12.2016

Laurer 2021

Laurer, M.: „Wirtschaftlichkeitsanalyse des Leiterplattenrecyclings auf Grundlagen einer KI-basierten Erkennung“, Bachelorarbeit, Technische Hochschule Aschaffenburg (2021)

Lu 2022

Lu, Y., Yang, B., Gao, Y., Xu, Z.: „An automatic sorting system for electronic components detached from waste printed circuit boards“, Waste Management, 137, 1-8 (2022)

Peper 2017

Peper, P.: „Evaluierung bildgebender Verfahren zur Klassifikation wertstoffreicher Elektronikkomponenten unter Berücksichtigung der Echtzeitfähigkeit“, Masterarbeit, Hochschule Aschaffenburg (2017)

Rücker 2017

J. Rücker: „Automatisierte Detektion und Extraktion von Elektroschrott-Komponenten mit Methoden der Bildverarbeitung und des maschinellen Lernens im Hinblick auf Tantal-Recycling“, Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, Hochschule Aschaffenburg (2017)

Schäfer 2021

Schäfer, P.: „Recycling – ein Mittel zu welchem Zweck?“, Pforzheim: Springer Spektrum (2021)

Schockert 2014

Y. Schockert; M. Berwanger; M. Koester. (2014): „Sensor-Based Tantalum Identification“. In: Sensor Technologies. Hrsg. Von K. Nienhaus, T. Pretz und H. Wotruba. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung. Herzogenrath: Shaker, 2014, S. 378 – 392. ISBN: 9783844025637

Schroth 2020

Schroth, K.: „Wirtschaftlichkeitsanalyse verschiedener Recyclingverfahren von Elektroaltgeräten“, Bachelorarbeit, Technische Hochschule Aschaffenburg (2020)

Schroth 2021

Schroth, K.: „Evaluierung von Entstückungsverfahren für das wirtschaftliche Recycling von elektrischen und elektronischen Altgeräten (EAG)“, Masterarbeit, Technische Hochschule Aschaffenburg (2021)

USGS 2021

US Geological Survey, „USGS – Mineral Commodity Summaries 2021“, Februar 2021, [Online] Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf> (letzter Zugriff 25.08.2021)

UN 2020

United Nations Security Council, „Mid-term report of the Group of Experts on the Democratic Republic of the Congo“, S/2020/1283, UN, New York, USA, <https://digitallibrary.un.org/record/3896010> (letzter Zugriff: 22.07.2022)

Suny Group 2020

Suny Group: „Circuit Board Recycling Machine“. [Online]. Available: <http://www.zygreenmachine.com/products/Circuit-Board-Crushing-Recycling-Machine/Automatic-PCB-Electronic-Component-Disma.html> (letzter Zugriff 24.03.2022)

Wu 2010

G.Q. Wu; Z.K. Zhang. (2010): „Recycling of waste printed circuit boards“. In: Circuit World 2010

Zange 2000

R. Zange, „Dissertation: Anwendungsbezogenes Prozeßmodell der Wandlung elektrischer Energie in Leistungsschallimpulse,“ Magdeburg, 2000.

Anhang

Anlage 1: Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
SVM	Support Vector Machine
CNN	Convolutional Neural Network
R-CNN	Region based CNN
EHZ	Elektrohydraulische Zerkleinerung
YOLO	You Only Look Once
NIR	Nahinfrarot
SSD	Single Shot Detector

Anlage 2: Auflistung der Kooperationspartner aus der Wirtschaft

Sesotec GmbH
Regener Straße 130, 94513 Schönberg

MAIREC Edelmetallgesellschaft mbH
Siemensstraße 20, 63755 Alzenau

HB Systems KG
Kohlgraben 2a, 97799 Zeitlofs / Rupboden