Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-41

Etablierung einer Kreislaufwirtschaft in der Elektroindustrie

Automatisiertes Demontagesystem für Schaltanlagen

A. Scheck, P. Bründl, H. G. Nguyen, J. Franke

ZUSAMMENFASSUNG Das Forschungsprojekt „ARKIDES“ adressiert die Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft in der Elektronikindustrie durch die Entwicklung eines automatisierten Demontagesystems für Elektrogroßgeräte. Unter Einsatz von Robotik und fortgeschrittener Bilderkennungstechnologie ermöglicht dieses System die effiziente Trennung und Rückgewinnung von Bauteilen. Dieser Beitrag stellt die im Projekt entwickelten Lösungsansätze vor.

STICHWÖRTER

Recycling, Automatisierung, Künstliche Intelligenz

Automated disassembly system for control cabinets - Circular economy in the electrical industry

ABSTRACT The research project „ARKIDES“ addresses the challenges of a circular economy in the electronics industry by developing an automated dismantling and sorting system for large electrical appliances. Using robotics and advanced image recognition technology, this system enables the efficient separation and recovery of components. This paper presents the solutions resulting from the project.

1 Einleitung

Die Herausforderungen einer effektiven Kreislaufwirtschaft in der Elektroindustrie werden durch die steigenden Anforderungen an Leistungsfähigkeit und Innovation erschwert. Der kontinuierliche Bedarf an Neugeräten führt jährlich zu einem wachsenden Volumen an Altgeräten, die nicht mehr verwendet werden können. Diese Entwicklung trägt maßgeblich zu einer steigenden Menge an Elektroschrott bei. Im Jahr 2022 erreichte das weltweite Aufkommen an Elektroabfällen ein Volumen von 62 Millionen Tonnen, was einer Steigerung von 82 % gegenüber dem Referenzjahr 2010 entspricht. Prognosen zufolge wird sich dieser Trend fortsetzen, sodass bis zum Jahr 2030 mit einem weiteren Anstieg um 32 % zu rechnen ist. Dies würde zu einer produzierten Gesamtmenge von 82 Millionen Tonnen Elektroschrott führen [1].

Die Komplexität und Größe elektronischer Geräte beeinflussen die Prozesseffizienz des Recyclings erheblich. Während kleinere Geräte mechanisch geschreddert werden können, stellt die Demontage größerer Geräte wie Schaltschränke eine besondere Herausforderung dar. Hier erfolgt die Wiedergewinnung von Bauteilen und Rohstoffen ausschließlich manuell, was in Hochlohnländern wie Deutschland kostspielig und ressourcenintensiv ist. Die Corona-Pandemie hat durch weltweite Lieferengpässe für Komponenten diese Herausforderung weiter verschärft.

Um eine nachhaltigere Kreislaufwirtschaft beim Rückkauf von Altanlagen zu fördern, Kosten zu reduzieren und die Versorgung mit Komponenten sicherzustellen, ist das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Forschungsprojekt „Automatisiertes Recycling von Elektrotechnik, Kabelbäumen und Schaltanlagen mit KI-gestützter, selbstlernender Demontage und Vorsortierung“ (kurz: ARKIDES) initiiert worden. ARKIDES fokussiert sich auf die Entwicklung einer automatisierten Demontage von Elektrogroßgeräten. Dabei wird am Beispiel des Schalt- und Steueranlagenbaus gezeigt, wie Robotik und visuelle Bauteilerkennung die Demontage effizienter gestalten können. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für das automatisierte Recycling von Geräten wie Fernsehern und Computern und trägt sowohl zur Erreichung von Umweltzielen als auch zur Stabilisierung der Lieferkette für elektronische Komponenten bei. Das Konsortium des Forschungsprojekts besteht aus den Unternehmen Mangelberger Elektrotechnik GmbH (Konsortialführer), E. Braun GmbH sowie Breit Formenbau KG und dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Der vorliegende Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Zunächst wird der aktuelle Stand der Technik im Bereich der automatisierten Kreislaufwirtschaft mit Fokus auf mechatronische Produkte dargestellt, als fundierter Ausgangspunkt für den weiteren Inhalt. Anschließend werden relevante Herausforderungen für ein automatisiertes Recycling in dem Bereich herausgearbeitet und die im Forschungsprojekt entwickelten Lösungen erläutert. Zum Schluss werden die Inhalte zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere notwendige Forschungen gegeben.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Bründl et al. [2] führen in ihrer Arbeit eine umfassende Literaturanalyse zum Automatisierungsfortschritt im Recycling komplexer mechatronischer Produkte durch. Sie arbeiten heraus, dass die Forschung in diesem Bereich eine zunehmende Fokussierung auf die Integration von Robotik und künstlicher Intelligenz (KI)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

zeigt. Dies spiegelt sich in einer Reihe von Entwicklungsströmungen wider, die sich mit intelligenten Demontagestrategien, Objekterkennung, Sortierung und speziell angepassten Roboterzellen befassen. Die Studie betont, wie essenziell die Entwicklung von robusten, automatisierten Systemen ist, um die vielfältigen Materialien, aus denen mechatronische Produkte bestehen, effektiv zu trennen und zurückzugewinnen. Zudem ist die Mensch-Roboter-Kollaboration ein zentraler Forschungsbereich, der darauf abzielt, die Komplexität und die Herausforderungen des Recyclings durch die Kombination von menschlichem Fachwissen und maschineller Präzision zu bewältigen. Die Datensynthese zeigt, dass trotz technologischer Fortschritte und erhöhtem Materialeinsatz in elektronischen Produkten die aktuellen Recyclingprozesse nicht effektiv genug sind, um die rapide ansteigende Menge an Elektroschrott zu bewältigen. Es wird die Notwendigkeit identifiziert, Recyclingprozesse zu automatisieren, damit eine effiziente Trennung und Wiedergewinnung der in den Abfällen enthaltenen wertvollen Materialien gewährleistet wird und mit ökonomischen Vorgaben verbunden werden kann.

Ein System, das in diesem Kontext immer relevanter wird, ist die Fahrzeugbatterie. Durch die fortlaufende Elektrifizierung in der Automobilbranche erhöht sich die Anzahl der im Feld vorhandenen Batterien, weswegen auch ihre End-of-Life-Prozesse stärker in den Fokus gerückt werden müssen. *Gerlitz et al.* [3] greifen diesen Aspekt auf und untersuchen die speziellen Herausforderungen bei der Demontage von Batteriemodulen bis auf Zellebene. Sie klassifizieren diese in produkt- und prozessbezogene Kategorien und schlagen Lösungsansätze vor, wie etwa die Erfassung der Modulvielfalt und die Klassifikation unlösbarer Verbindungen. Die Autoren betonen die Notwendigkeit einer flexiblen und rekonfigurierbaren Demontageanlage, um den sich schnell ändernden Anforderungen gerecht zu werden.

Al Assadi et al. [4] entwickeln in diesem Zusammenhang eine flexible Roboterzelle für die vollautomatisierte Demontage von Batteriemodulen aus Batteriesystemen. Die Roboterzelle integriert alle notwendigen Werkzeuge und Prozesse zur vollautomatischen Demontage von Batteriemodulen. Erste Ergebnisse zeigen vielversprechende Resultate, was eine sortierte Entsorgung und Wiederverwertung der Materialien ermöglich.

Ergänzend dazu beschreiben *Lanza et al.* [5] in ihrem Beitrag ein agiles Produktionssystem für die automatisierte Demontage von Anlassermotoren, das auch unter ungewissen Produktzuständen effektiv arbeitet. Ihr Ansatz lernende Roboter, KI und digitale Zwillinge als Lernumgebungen einzusetzen, zeigt, wie die Flexibilität und Adaptivität, die von *Gerlitz et al.* gefordert wurde, in einem konkreten System umgesetzt werden kann.

Ein entscheidender Aspekt bei der automatisierten Demontage verschiedener Komponenten ist die Erkennung und Klassifikation von Schraubköpfen. *Mangold et al.* [6] adressieren diese Herausforderung mit einem kamerabasierten System, das maschinelle Lernverfahren, insbesondere die YOLOv5-Architektur, nutzt. Ihre Arbeit ergänzt die vorherigen Studien, indem sie eine spezifische Lösung für ein häufig auftretendes Problem in der Demontage bietet. Die erfolgreiche Validierung an Fensterheber- und Startermotoren, auch unter erschwerten Bedingungen wie Verschmutzung oder Korrosion, unterstreicht die praktische Anwendbarkeit dieses Ansatzes.

3 Herausforderungen für die automatisierte Demontage von Schaltschränken

Das Ziel einer automatisierten Demontage von Schaltschränken erfordert die Überwindung verschiedener herausfordernder Aspekte des Prozesses. In diesem Kapitel werden die fünf relevantesten, technologiebezogenen Herausforderungen umfassend dargestellt und diskutiert.

3.1 Chaotisches und komplexes Erscheinungsbild von Schaltschränken

Schaltschränke variieren stark in ihrem Design und Aufbau aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen von Herstellern, Verwendungszwecken und Installationsumgebungen. So können beispielsweise Schaltschrankkonfigurationen in der Lebensmittelindustrie deutlich von Konfigurationen in der Automobilproduktion abweichen. Diese Variabilität stellt eine erhebliche Herausforderung für automatisierte Demontagesysteme dar. Die Hersteller verbauen Schaltschrankkomponenten wie Schütze, Relais, Sicherungen oder Kabel projektspezifisch und individuell angeordnet, was dazu führt, dass die Schaltschrankdemontage keinem vollständig standardisierten Vorgehen folgen kann.

Die maßgeschneiderten Konstruktionen führen dazu, dass Schaltschränke für ein automatisiertes System oftmals chaotisch wirken, da es keine einheitliche Anordnung der Komponenten gibt. Diese Komplexität erschwert die optische Erkennung und Lokalisierung der einzelnen Bauteile. Ein automatisiertes System muss in der Lage sein, die verschiedenen Designs zu erkennen und die genaue Position sowie Art der zu entfernenden Komponenten zu bestimmen. Zudem sind unterschiedliche Demontagewerkzeuge erforderlich, um die verschiedenen Befestigungsarten und Bauteilgrößen handhaben zu können. Der begrenzte Raum und die Nähe der Komponenten zueinander erhöhen die Komplexität zusätzlich.

Es ist ein flexibles System erforderlich, das Verfahren des maschinellen Lernens oder andere adaptive Technologien einsetzt, um die verschiedenen Schaltschrankdesigns zu identifizieren und eine entsprechende Strategie zu entwickeln. Diese Systeme können aus verschiedenen Demontagevorgängen lernen und ihre Leistung kontinuierlich verbessern, um trotz des komplexen Erscheinungsbilds eine effiziente und sichere Demontage zu ermöglichen.

3.2 Vielfalt an Komponenten und Materialien

Die in den Schaltschränken verbauten Komponenten bestehen häufig aus unterschiedlichen Werkstoffen und Materialverbünden, was zu erhöhten Handhabungs- und Recyclingprozessaufwänden führt. Die vorhandene Vielfalt an Komponenten macht die Entwicklung standardisierter Demontageprozesse zusätzlich herausfordernd.

Ein automatisiertes System muss in der Lage sein, die Materialien zu erkennen, zu trennen und gegebenenfalls unterschiedliche Handhabungsmethoden anzuwenden, um Beschädigungen oder Materialvermischungen zu vermeiden. Die Herausforderung wird weiter verstärkt durch die Tatsache, dass bestimmte wertvolle Materialien wie Kupfer, Aluminium und Edelmetalle ohne eine vorherige, präzise Identifizierung schwer zu trennen sind. Eine ineffiziente Sortierung führt zu Materialverlusten und gefährdet

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

die wirtschaftliche Rentabilität des Prozesses. Außerdem müssen gefährliche Substanzen wie Blei, Quecksilber oder Cadmium korrekt erkannt und gehandhabt werden, um Gesundheits- und Umweltrisiken zu minimieren.

3.3 Befestigungsmechanismen von Schaltschrankkomponenten hindern automatisierte Demontage

Die Komponenten in Schaltschränken sind in der Regel durch verschiedene Befestigungsmechanismen wie Schrauben, Clips oder Rastverbindungen gesichert, die für eine manuelle Montage und Wartung konzipiert wurden. Diese Mechanismen variieren je nach Hersteller und Art der Komponente erheblich, was eine standardisierte automatisierte Demontage erschwert. Automatisierte Systeme müssen daher in der Lage sein, diese unterschiedlichen Befestigungsarten zu erkennen und geeignete Werkzeuge oder Strategien zu verwenden, um die Komponenten effizient und ohne Beschädigung zu entfernen.

Ein weiteres Problem ist der begrenzte Platz im Schaltschranks, der es schwierig macht, dass ein automatisiertes System Zugang zu allen Befestigungspunkten findet. Werkzeuge müssen flexibel und anpassbar sein, um in engen Räumen zu arbeiten, und gleichzeitig die Stabilität und Präzision gewährleisten, die für die Entfernung von Komponenten erforderlich ist. Zudem müssen automatisierte Systeme darauf achten, dass beim Entfernen der Komponenten keine kritischen Verbindungen beschädigt oder gefährliche Situationen, wie freiliegende elektrische Anschlüsse, geschaffen werden.

3.4 Qualität und Funktionsfähigkeit der Bauteile nach Altanlagenrückkauf nur schwer bestimmbar

Die Qualität und Funktionsfähigkeit der Bauteile in Altanlagen können nach deren Rückkauf schwer zu bestimmen sein. Elektronische Komponenten altern mit der Zeit und Faktoren wie Temperatur, Feuchtigkeit, Verschmutzung und mechanischer Verschleiß können ihre Funktionsfähigkeit beeinträchtigen. Daher muss ein automatisiertes System zur Demontage eine Methode entwickeln, um festzustellen, welche Komponenten noch funktionsfähig sind und wiederverwendet werden können. Der Zustand von Relais, Schützen und anderen wichtigen Bauteilen ist oft nur durch detaillierte Tests feststellbar, was einen zusätzlichen Schritt im Demontageprozess erfordert. Eine ungenaue oder ineffiziente Überprüfung kann dazu führen, dass funktionstüchtige Komponenten nicht erkannt oder beschädigte Teile fälschlicherweise als brauchbar eingestuft werden.

Der Einsatz automatisierter Testverfahren wäre hilfreich, ist aber ebenfalls eine Herausforderung, da unterschiedliche Testmethoden für verschiedene Bauteile und Zertifizierungen notwendig sind. Die Verfügbarkeit detaillierter Daten zu den spezifischen Anforderungen der Komponenten kann ebenfalls eingeschränkt sein, vor allem bei älteren oder spezialisierten Teilen. Ein automatisiertes System muss also eine effektive Strategie entwickeln, um Komponenten schnell und genau zu testen und so die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Rückkauf- und Demontageprozesses zu steigern.

3.5 Inkompatible Standardisierungen

Die Demontageprozesse können durch fehlende oder inkonsistente Normen und Standards erheblich erschwert werden. Obwohl es Normen für Schaltschränke und deren Komponenten gibt, wie etwa IEC 61439 [7] für Niederspannungsschaltgerätekombinationen oder DIN EN 62208 [8] für leere Gehäuse, sind diese primär auf Sicherheit und Funktionalität ausgerichtet und adressieren nicht explizit die Montage- oder Demontagegerechtheit der Systeme. Viele Komponenten in Schaltschränken sind trotz dieser Normen nicht einheitlich gekennzeichnet oder spezifiziert, was zu Schwierigkeiten bei der automatisierten Identifizierung und Demontage führt. Manche Hersteller nutzen eigene Kennzeichnungssysteme oder Spezifikationen, die über die Mindestanforderungen der Normen hinausgehen, was bedeutet, dass ein automatisiertes System möglicherweise die genaue Art und Funktion der Bauteile nicht erkennen kann. Ein weiteres Problem ist, dass die Befestigungsmechanismen und Layouts trotz existierender Normen nicht vollständig standardisiert sind. Dadurch sind Demontagestrategien für ein System eines Herstellers nicht ohne Weiteres auf ein anderes übertragbar. Unterschiedliche Materialien und Formen erfordern verschiedene Handhabungsstrategien, was die Entwicklung eines automatisierten Demontagesystems weiter erschwert.

Eine Lösung könnte in der Erweiterung bestehender Normen oder der Einführung neuer Standards liegen, die speziell auf die Anforderungen der automatisierten Demontage ausgerichtet sind. Diese könnten einheitliche Kennzeichnungssysteme vorschreiben, die es automatisierten Systemen erlauben, Komponenten unabhängig vom Hersteller zu erkennen und korrekt zu behandeln. Zudem könnten Datenbanken entwickelt werden, die detaillierte Informationen zu den Spezifikationen verschiedener Komponenten und deren Demontage enthalten, basierend auf den erweiterten Normen. Dies würde eine erhebliche Koordination zwischen Herstellern, Normungsgremien und Recyclingunternehmen erfordern, was Zeit und Ressourcen beansprucht. Ohne solche spezifischen Standardisierungen müssen automatisierte Systeme sehr anpassungsfähig sein und auf fortschrittliche Erkennungstechnologien setzen, um mit den unterschiedlichen Bauteilen und variierende Umsetzungen der bestehenden Normen umzugehen.

4 Lösungsansätze im Forschungsprojekt „ARKIDES“

Die im Projekt anvisierten Lösungsansätze zielen auf unterschiedliche Herausforderungen ab, wodurch das Ziel einer automatisierten Kreislaufwirtschaft effektiv verfolgt wird. Die entwickelten Konzepte berücksichtigen die Vielzahl unterschiedlicher Systemanforderungen und ermöglichen eine flexible Anpassung an individuelle Herstellerstandards. Durch die Integration von KI-basierter Bilderkennung und Robotik wird die Effizienz der Demontageprozesse verbessert, um die Nachhaltigkeit und Ressourcennutzung in industriellen Anwendungen zu maximieren. **Bild 1** stellt die Prozesspipeline der entwickelten Lösung anschaulich dar.

Zu Anfang des Prozesses wird der Schaltschrank durch den Einsatz eines Deep-Learning-basierten Objekterkennungsmodells analysiert und für den folgenden Demontageprozess relevante Informationen extrahiert. Diese werden anschließend sowohl in einer Datenbank gespeichert als auch direkt an die Steuerung des

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

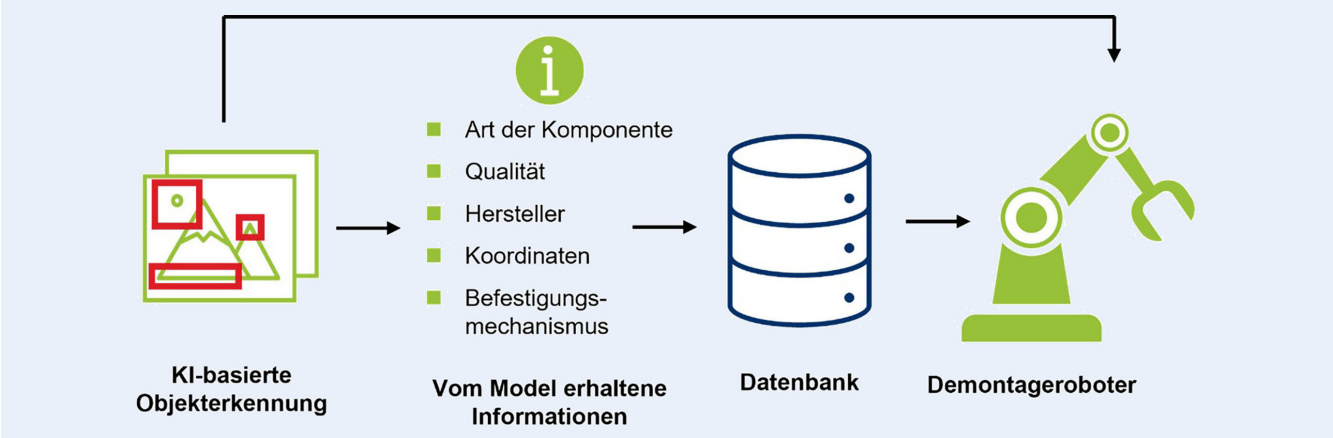

Bild 1. Schematische Darstellung der im Forschungsprojekt „Arkides" entwickelten Prozesskette. *Grafik: Lehrstuhl FAPS*

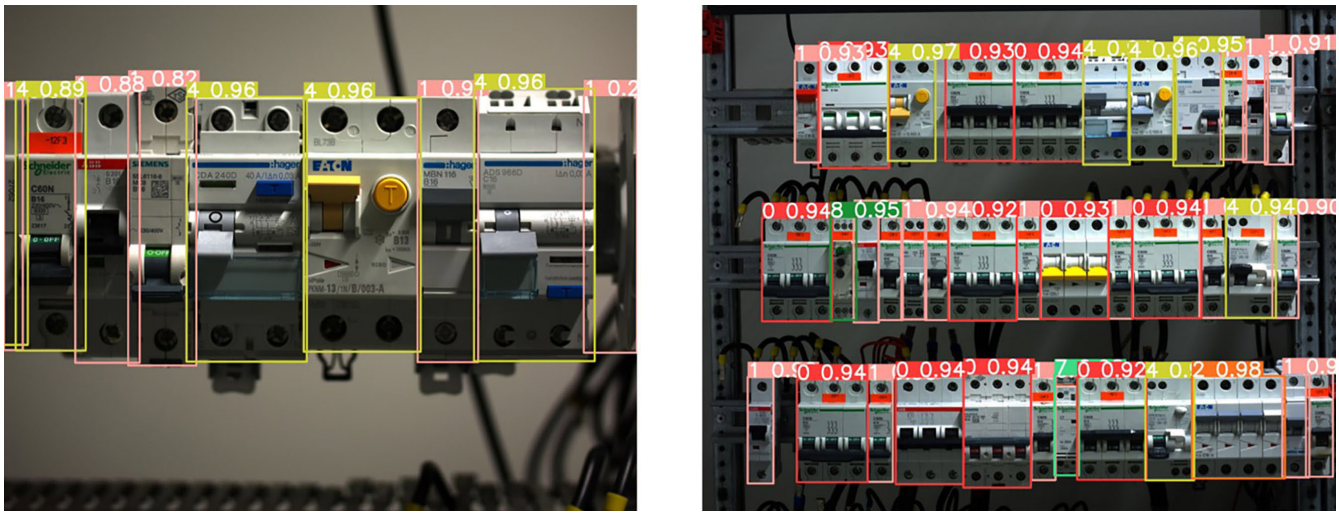

Bild 2. Exemplarische Durchführung der Objekterkennung an zwei unterschiedlichen Testbildern mit dem trainierten YOLOv8- Modell. *Foto: Lehrstuhl FAPS*

Roboters kommuniziert. Durch die Kombination aus in der Datenbank bereits vorhandenen Daten und den aktuellen Auswerteergebnissen des Analysemodells, kann der Roboter den Demontageprozess präzise und zuverlässig durchführen.

Die Detektion von Komponenten und deren Befestigungsmechanismen mittels maschineller Lernverfahren ist ein kritischer Lösungsansatz, um die automatisierte Demontage zu ermöglichen und die Genauigkeit bei der Erkennung von Bauteilen zu erhöhen. Der Fokus liegt auf der Computer-Vision-basierten Identifizierung aller bisher bekannten sowie unbekannten Komponenten in den Schaltschränken. Dabei werden auch Befestigungen wie Nieten und Schraubenköpfe erkannt. Diese präzise Identifikation bildet die Basis für die folgenden Demontageprozesse der Robotiksysteme.

Hierfür existieren bereits verschiedene Deep-Learning-basierte Objekterkennungsmodelle im Bereich der Convolutional Neural Networks und Vision-Transformer-Modelle, die den traditionellen Bildverarbeitungsmethoden, vor allem bei komplexen Bildern mit viel Inhalt, deutlich überlegen sind [9]. Das Modell YOLO (kurz für: You Only Look Once) ermöglicht in seiner achten Version sowohl eine Objekterkennung als auch semantische Bildsegmentierung und zeichnet sich durch hohe Vorhersagegenauigkeit, kurze Verarbeitungszeiten und vielseitige Anwendungsmöglichkeiten aus [10]. Diese Merkmale machen YOLOv8 besonders geeignet für die Erkennung und Identifikation von Bauteilen und Befestigungsmechanismen in Schaltschränken. Die Geschwindigkeit und Präzision des Modells erlauben eine effiziente Planung und Durchführung der automatisierten Demontageprozesse, indem wichtige Informationen, wie Anzahl, Position, Orientierung und Art der Komponenten ohne große Verzögerungen an die dahinter liegende Wissensdatenbank sowie den Demontageroboter geleitet werden. Erste Versuche mit realitätsnahen Bedingungen zeigen vielversprechende Ergebnisse. **Bild 2** zeigt eine exemplarische Auswertung von zwei Testbildern, die jeweils unter unterschiedlichen Lichtbedingungen und in verschiedenen Abständen aufgenommen wurden.

Auf den Bildern sind jeweils Fehlerstrom-Schutzschalter, 1-, 2-, 3- und 4-polige Leistungsschutzschalter sowie Relais in verschiedenen Ausführungen von unterschiedlichen Herstellern zu sehen. Während das linke Bild Komponenten einer einzelnen Hutschiene darstellt, sind auf dem rechten Bild deutlich mehr elektrische Komponenten zu sehen. Trotz der unterschiedlichen Perspektiven ist das Modell in der Lage, die Bauteile präzise zu erkennen und zu klassifizieren.

Der Aufbau einer Wissensdatenbank für die Wiederverwendbarkeit elektrischer und elektronischer Komponenten ist ein wesentlicher Schritt zur Verbesserung der Identifizierung sowie Qualitäts- und Funktionsprüfung von Bauteilen. Die Datenbank

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

enthält ein Rahmenwerk mit spezifischen Kriterien und Prüfverfahren, um die Identifizierung und Überprüfung dieser Komponenten zu erleichtern. So können wiederverwendbare Teile erkannt und ihre Sicherheit sowie Funktionalität gewährleistet werden. Zusätzlich sind detaillierte Informationen zu verwendbaren Komponenten enthalten, die für eine Etablierung klarer Richtlinien und Prüfverfahren zur Qualitätsbestimmung nötig sind, sodass die Herausforderung der ungewissen Bauteilqualität adressiert werden kann.

Es können systematisch Informationen gespeichert werden, die automatisierte Systeme nutzen können, um die variablen Designs und komplexen Layouts von Schaltschränken zu bewältigen. Die Anreicherung mit Sensordaten erleichtert die Identifikation während des Demontageprozesses. Dies hilft automatisierten Systemen, einzelne Bauteile präziser zu erkennen und effizienter zu demontieren. Zudem ermöglicht die Wissensdatenbank dem Demontagesystem, durch kontinuierliches Lernen aus vorherigen Erfahrungen effizienter zu arbeiten und komplexe, unübersichtliche Schaltschrankdesigns besser zu verstehen. Die Kombination aus Wissensdatenbank und maschinellem Lernen erleichtert die Entwicklung effizienter Demontagestrategien. Indem die Komponenten und ihre Befestigungen präzise erkannt werden, kann das System durch Zugriff auf die Datenbank geeignete Demontagewerkzeuge auswählen und die besten Prozesse für die sortenreine Trennung der Materialien anwenden. Dadurch wird das Risiko minimiert, benachbarte Komponenten zu beschädigen, und die Effizienz der Rohstoffgewinnung steigt. Dies adressiert auch die Herausforderung, die Funktionsfähigkeit und Qualität von Altteilen zu bewerten, indem nur die Komponenten identifiziert und entfernt werden, die für eine Wiederverwendung geeignet sind.

Anschließend erfolgen eine automatisierte Planung und Durchführung des Demontageprozesses. Dieser Teilschritt umfasst sowohl die hardware- als auch die softwareseitige Umsetzung der Automatisierungslösung. Mithilfe der Kamerasensoren sammelt der Roboter umfassende Daten über die zu demontierenden Schaltschränke und ihre Komponenten. Auf dieser Basis erfolgt eine automatisierte Planung des Demontage- und Sortierprozesses, indem die Reihenfolge, Bahnplanung und die Auswahl der erforderlichen Werkzeuge bestimmt werden. Die mithilfe der KI-basierten Objekterkennungsmodelle gewonnenen Informationen zur Position der Bauteile und ihrer Befestigungsmechanismen, können in Kombination mit weiteren Informationen aus der Datenbank genutzt werden, um die passenden Demontagewerkzeuge auszuwählen und durch den Roboter gezielt einzusetzen.

In ersten Versuchen mit verschiedenen Testdatensätzen und dem YOLOv8-Modell wurde ein Root Mean Squared Error (RMSE) im Bereich von 0,88 mm bis 1,34 mm erzielt. Durch eine sorgfältige Bahnplanung und die Festlegung einer optimalen Demontagereihenfolge sorgt der Roboter dafür, dass die Bauteile effizient und ohne Beschädigung benachbarter Komponenten entfernt werden. Dies maximiert die Wiederverwendbarkeit der Komponenten und ermöglicht eine sortenreine Trennung der Materialien. Die Kombination aus intelligenter Datenverarbeitung und automatisierter Ausführung gewährleistet einen hochpräzisen und effizienten Demontageprozess, der die benötigte Arbeitszeit reduziert und menschliche Fehler minimiert.

Durch die Entwicklung eines Expertensystems können Konstruktionsrichtlinien festgelegt werden, um die variablen und komplexen Designs von Schaltschränken sowie den darin angebrachten Komponenten zu standardisieren und so die automatisierte Demontage zu erleichtern. Mit diesen Design- und Layoutvorgaben wird angestrebt, die Komponenten in den Schaltschränken möglichst einheitlich zu positionieren und zu befestigen, wodurch Robotiklösungen die Bauteile effizienter erkennen und demontieren können.

Während die Maße der Hutschienen für Schaltschrankanlagen bereits standardisiert sind, kann die Erforschung der roboterbasierten Demontage der verschiedenen elektrischen Komponenten zu wichtigen Erkenntnissen hinsichtlich demontage- und automatisierungsgerechter Befestigungsmechanismen führen. Die so gewonnenen Informationen können in Form von Konstruktionsrichtlinien, Leitfäden oder Standards dokumentiert werden, die sowohl für Schaltanlagen- als auch Komponentenhersteller gelten. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Herstellern, Forschern und Normungsgremien. Solche Richtlinien könnten nicht nur die Fertigung und Montage erleichtern, sondern auch eine beschädigungsfreie Demontage der Komponenten ermöglichen. Dadurch wird die sortenreine Trennung der Ressourcen verbessert und die Effizienz bei der Rohstoffgewinnung gesteigert. Intakte Komponenten erleichtern die präzise Identifikation und Kategorisierung der Materialien, was eine effizientere Sortierung und Wiederaufbereitung ermöglicht. Zusätzlich kann das System helfen, einheitliche Kennzeichnungsmethoden zu etablieren, damit Robotiksysteme Komponenten besser erkennen und identifizieren können. Dies löst das Problem inkompatibler Standards durch eine konsistente Kennzeichnung und Spezifikation verschiedener Bauteile.

An den eigentlichen Demontageprozess anschließend erfolgt die Bewertung sowie mögliche Wiederverwertung der gewonnenen Kunststoffteile. Hierfür wird ein Leitfaden entwickelt, der die Verwendung von recyceltem Regranulat im Kunststoffspritzguss darstellt. Ziel ist die Erstellung eines praxisorientierten Regelwerks, das die Verwendung recycelter Rohstoffe im industriellen Kunststoffspritzguss ermöglicht. Gegenwärtige Vorgaben in Richtlinien und Normen sind oftmals zu restriktiv und schränken den Einsatz von Recyclingkunststoffen ein. Dies verhindert eine nachhaltige und effiziente Wiederverwendung von Kunststoffen [11].

Der neue Leitfaden soll diese Einschränkungen überwinden, indem er klare und pragmatische Richtlinien für die Integration von recyceltem Regranulat in den Produktionsprozess vorgibt. Im Gegensatz zu bestehenden allgemeinen Richtlinien zum nachhaltigen Produktdesign bietet dieser Leitfaden spezifische, direkt umsetzbare Lösungen für die Kunststoffspritzgussindustrie und schließt auf diese Weise die Lücke zwischen theoretischen Nachhaltigkeitskonzepten und den praktischen Anforderungen der industriellen Fertigung. Er wird spezifische Parameter definieren, die die Qualitätsstandards sowohl für das Rohmaterial als auch für das Endprodukt sicherstellen. Dazu gehören beispielsweise Anforderungen an die Reinheit und die Zusammensetzung des Regranulats sowie Empfehlungen zur optimalen Verarbeitungsmethode im Spritzgussverfahren. Diese konkreten Vorgaben ermöglichen es Unternehmen, Recyclingkunststoffe effektiv in ihre Produktionsprozesse zu integrieren. Durch die Umsetzung dieser Richtlinien kann die Verwendung von recyceltem Kunststoff erheblich gesteigert werden, was zu einer Verringerung des Bedarfs an neuen Rohstoffen führt und die Abhängigkeit von erdölbasierten Kunststoffen reduziert.

Die vorgestellte Prozesskette sowie die begleitenden Technologien werden mit offenen Standards und Open-Source-Lösungen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

implementiert. So wird etwa im Bereich der Computer Vision und Wissensdatenbank ausschließlich auf Open-Source-Bibliotheken zurückgegriffen. Diese Ausrichtung auf offene Standards und Open-Source-Bibliotheken mit gut dokumentierten Schnittstellen ermöglicht es, das System auf verschiedene Demontageaufgaben anzulernen und in der breiten Masse der Industrieanwendungen einzusetzen. Dadurch wird das Potenzial der wirtschaftlichen Verwertung erheblich gesteigert.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsprojekt „ARKIDES“ demonstriert entscheidende Fortschritte im Bereich der automatisierten Kreislaufwirtschaft von Schaltschrankanlagen. Durch die Integration moderner Robotik und fortschrittlicher Bilderkennungstechnologien wird ein System entwickelt, das in der Lage ist, komplexe Demontageaufgaben effizient zu bewältigen.

Ausblickend ist zu erwarten, dass die Ergebnisse von ARKIDES über das aktuelle Forschungsprojekt hinaus Bedeutung finden werden. Es wird angestrebt, die entwickelten Technologien und Methoden weiter zu verfeinern und auf andere Bereiche der Kreislaufwirtschaft auszudehnen. Zukünftige Forschungsarbeiten könnten sich auf die Skalierung der Technologien für industrielle Anwendungen konzentrieren oder neue Materialien und Produkte in die Recyclingprozesse integrieren.

FÖRDERHINWEIS

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse werden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten und vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt betreuten Forschungsprojekts „Automatisiertes Recycling von Elektrotechnik, Kabelbäumen und Schaltanlagen mit KI-gestützter, selbstlernender Demontage und Vorsortierung – ARKIDES (01MN23009D)“ erarbeitet.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
DLR Projektträger

Literatur

[1] Baldé C. P., Kuehr R., Yamamoto T. et al.: The Global E-waste Monitor 2024. International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNTAR), Geneva/Bonn. Stand: 2024: Internet: https://api.globalewaste.org/publications/file/297/Global-E-waste-Monitor-2024.pdf. Zugriff am 07.08.2024
[2] Bründl, P.; Scheck, A.; Nguyen, H. G. et al.: Towards a circular economy for electrical products: A systematic literature review and research agenda for automated recycling. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 87 (2024) #102693
[3] Gerlitz, E.; Greifenstein, M.; Hofmann, J. et al.: Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated Disassembly System. Procedia CIRP 96 (2021), pp. 175–180
[4] Assadi, A. A.; Götz, T.; Gebhardt, A. et al.: Automated Disassembly of Battery Systems to Battery Modules. Procedia CIRP 122 (2024), pp. 25–30
[5] Lanza, G.; Asfour, T.; Beyerer, J. et al.: Agiles Produktionssystem mittels lernender Roboter bei ungewissen Produktzuständen am Beispiel der Anlasser-Demontage. at – Automatisierungstechnik 70 (2022) 6, S. 504–516
[6] Mangold, S.; Steiner, C.; Friedmann, M. et al.: Vision-Based Screw Head Detection for Automated Disassembly for Remanufacturing. Procedia CIRP 105 (2022), pp. 1–6
[7] DIN EN IEC 61439–1: Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Teil 1: Allgemeine Festlegungen. Deutsche Fassung, Ausgabe Oktober 2021
[8] DIN EN 62208: Leergehäuse für Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Allgemeine Anforderungen. Deutsche Fassung, Ausgabe Juni 2021
[9] Wu, H.; Liu, Q.; Liu, X.: A Review on Deep Learning Approaches to Image Classification and Object Segmentation. Computers, Materials & Continua 60 (2019) 2, pp. 575–597
[10] Terven, J.; Córdova-Esparza, D.-M.; Romero-González, J.-A.: A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. Machine Learning and Knowledge Extraction 5 (2023) 4, pp. 1680–1716
[11] Foschi, E.; Bonoli, A.: The Commitment of Packaging Industry in the Framework of the European Strategy for Plastics in a Circular Economy. Administrative Sciences 9 (2019) 1, p. 18

Albert Scheck, M.Sc.
albert.scheck@faps.fau.de
Tel. +491728451886
Foto: Autor

Patrick Bründl, M.Sc.

Huong Giang Nguyen, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Fürther Str. 246b, 90429 Nürnberg
www.faps.fau.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY