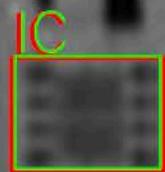
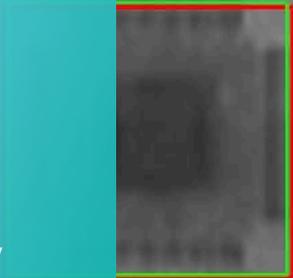
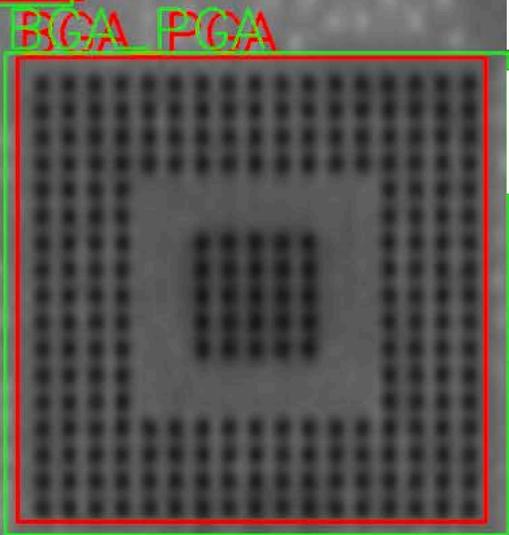
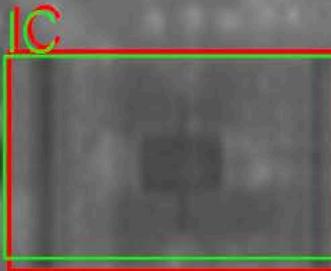
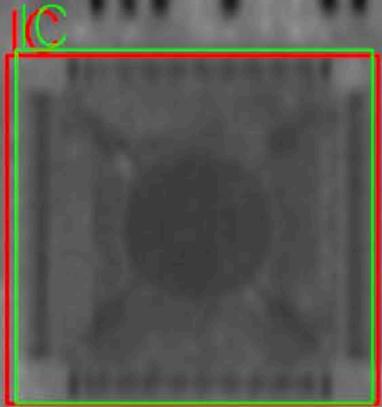


XRT zur Sortierung von Leiterplatten für das Recycling mit Hilfe maschinellen Lernens

Markus Firsching, Steffen Rüger, Wladislaw Benner,
Malte Vogelgesang, Johannes Leisner, Alexander
Ennen



Motivation

- Der Gehalt an wertvollen Elementen in Leiterplatten (WPCBs) aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) schwankt sehr stark
- Der Wert kann i.M. nur grob geschätzt werden (Stichproben)
 - Aufwändig und fehleranfällig
- Ansatz: Wertbestimmung anhand der Komponenten
- Existierende Ansätze arbeiten mit optischen Aufnahmen
 - Nur Komponenten auf der Oberseite erkennbar
 - Empfindlich gegen Verschmutzungen und Staub
- Vorteil von Röntgenaufnahmen
 - Durchstrahlungsaufnahmen, d.h. alle Komponenten sichtbar, egal auf welcher Seite die Platine liegt
 - Unempfindlich gegenüber Verschmutzung und Staub



© Fairphone, CC BY-NC-SA

Materialien und Methoden

Ablaufschema der Wertbestimmung

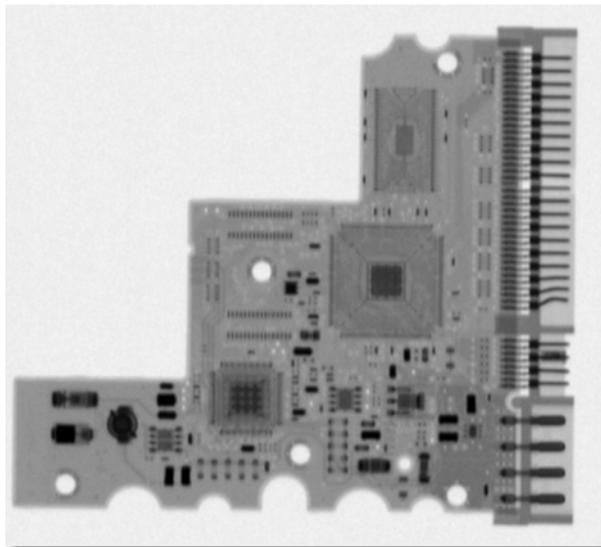
- Die Eingangsdaten werden mittels eines künstlichen tiefen neuronalen Netzwerks verarbeitet, das Komponenten auf der zugrundeliegenden Leiterplatte detektiert.
- Im folgenden Schritt werden die Detektionsergebnisse durch ein mathematisches Modell für die Bestimmung des Leiterplattenwertes weiterverarbeitet



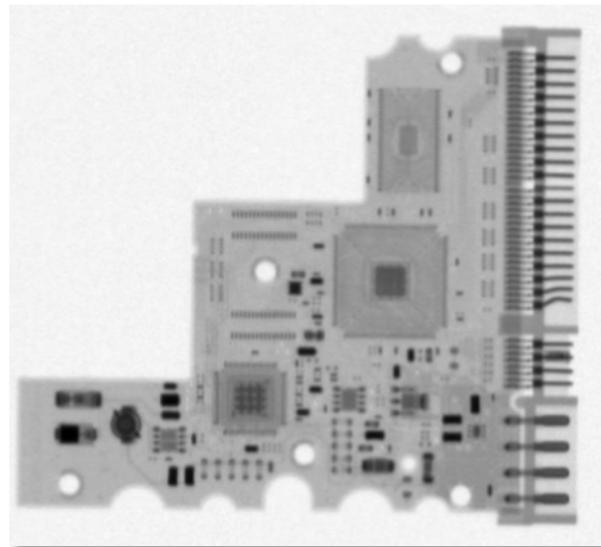
Materialien und Methoden

Röntgen-Messungen

DE-XRT
Eingangs-
daten



Low energy



High energy

104 Leiterplatten, z.T. beidseitig bestückt

Röntgenquelle: 100 kV, 15 mA

Dual Energy Zeilendetektor, 0,4 mm Pixel

Bandgeschwindigkeit von 0,45 m/s

Materialien und Methoden

Datenbasis

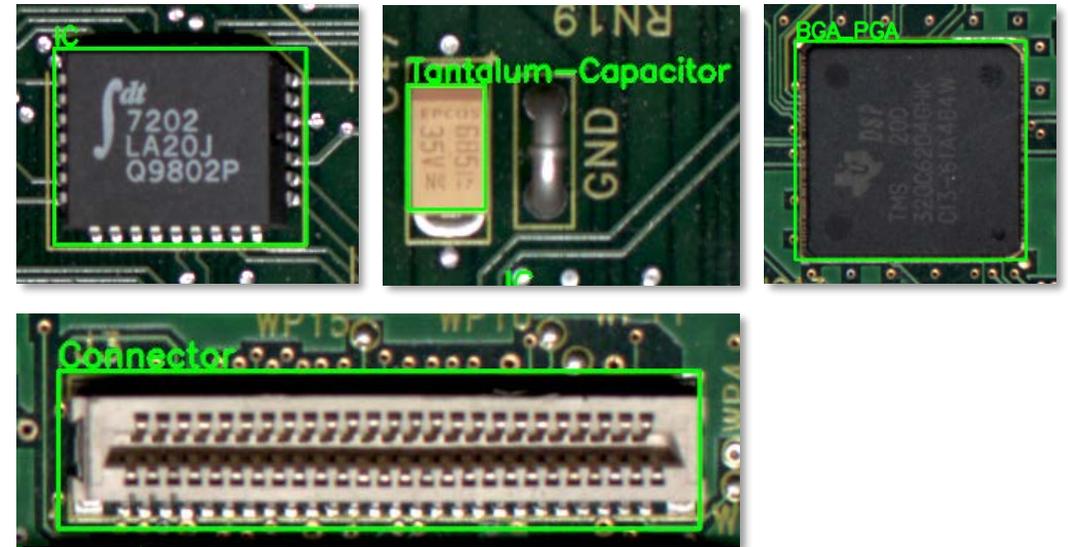
DE-XRT
Eingangs-
daten

Zu detektierende Bauelemente

- IC (engl. Integrated Circuits = Integrierte Schaltkreise)
 - TC (engl. Tantalum Capacitor = Tantalkondensatoren)
 - C (engl. Connector = Steckverbinder)
 - BGAs/PGA (Ball Grid Arrays / Pin Grid Arrays = spez. Gehäuseform von ICs, etwa für große Prozessoren)
- 104 Leiterplatten davon 77 einseitig und 27 beidseitig mit Bauelementen bestückt

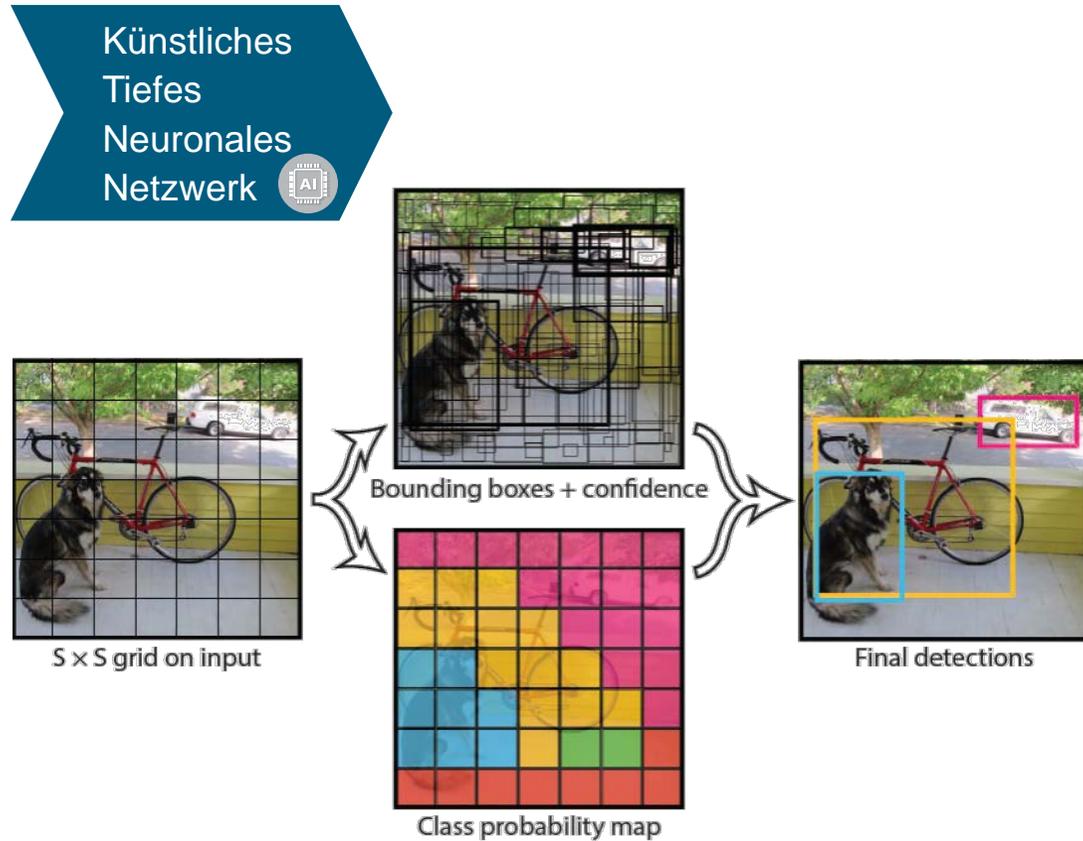
Anzahl der klassifizierten Bauelemente auf 104 Leiterplatten (WPCBs)

	Bauelemente/Komponenten				
	IC	TC	C	BGA/PGA	Gesamt
Anzahl	1893	903	523	66	3385



Materialien und Methoden

Deep Learning Modell



Bildquelle: Redmon et al. "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection", 2016

YOLO (You Only Look Once)

1

YOLO: Deep Learning zur Objektdetektion

2

Zuweisung relevanter Regionen durch Rahmen (engl. Bounding Boxes) und deren Klassenzuweisung

3

Realisiert durch ein einziges tiefes neuronales Netzwerk, dass Bounding-Box-Koordinaten und deren Klassifizierung direkt aus dem Eingabebild vorhersagt

4

Sehr hohe Vorhersagegeschwindigkeit
Erlernen von kontextbezogenen Merkmalen direkt aus den Eingangsdaten

Materialien und Methoden

Wertbestimmungsmodell



1. Analyse der Elementgehalte

Verwendete Methoden:

1. Gold: ICs und BGA/PGAs und Konnektoren: Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES), Goldpreis 1750 € pro Feinunze
2. Tantalkondensatoren: Direkt berechnet aus dem Marktwert pro kg

2. Ermittlung des mittleren Materialwertes

	Bauelemente/Komponenten			
	IC	TC	C	BGA/PGA
Mittlerer Materialgehalt pro Stück	0,457 mg Au	767 mg Ta-Kondensator	0,914 mg Au	4,71 mg Au
Mittlerer monetärer Wert pro Stück	2,6 ct	1,9 ct	5,1 ct	26,5 ct

Materialien und Methoden

Maße zur Bewertung

Maße zur Bewertung

$$\text{Genauigkeit (Precision)} = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$\text{Trefferquote (Recall)} = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$F_1\text{-Ma\ss} = 2 * \frac{\text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

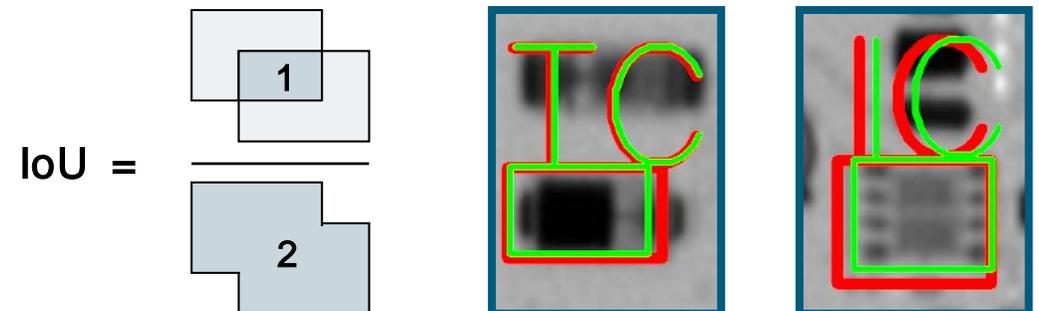
Kriterium für „True Positive“ in der Objektdetektion:

„Intersection over Union“ $IoU > 0,5$

Schnittmenge $A_{\text{wahr}} \cap B_{\text{vorhergesagt}}$

Konfusionsmatrix

		Tatsächlich (wahr)	
		Positive	Negative
Vorhersage	Positive	TP: True Positive	FP: False Positive
	Negative	FN: False Negative	TN: True Negative



Ergebnisse

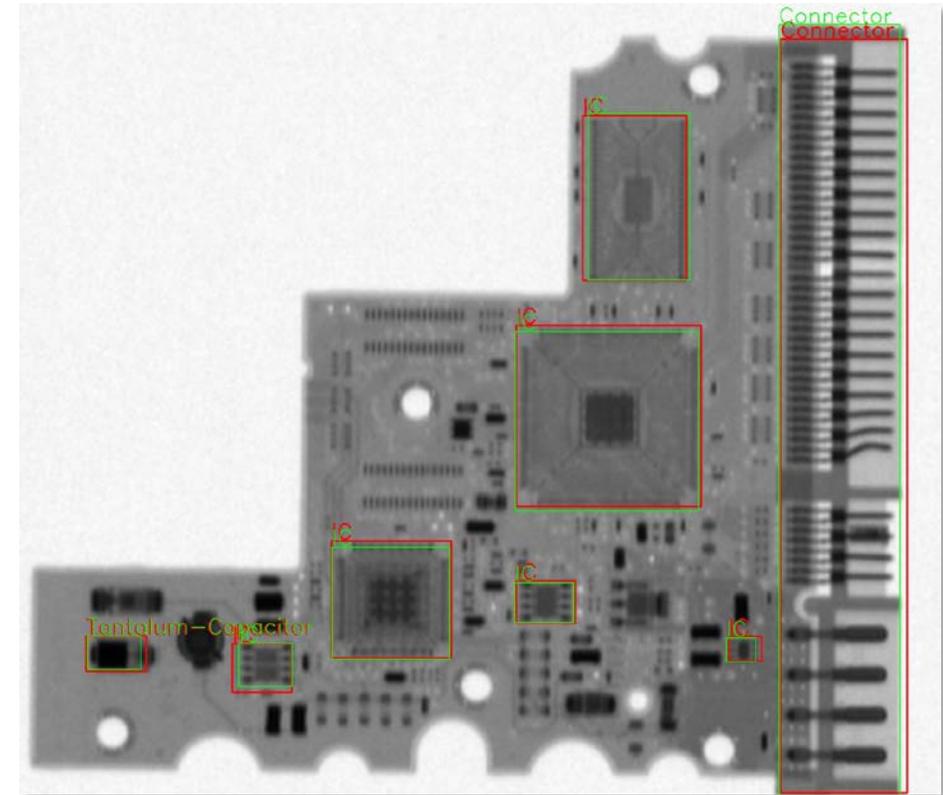
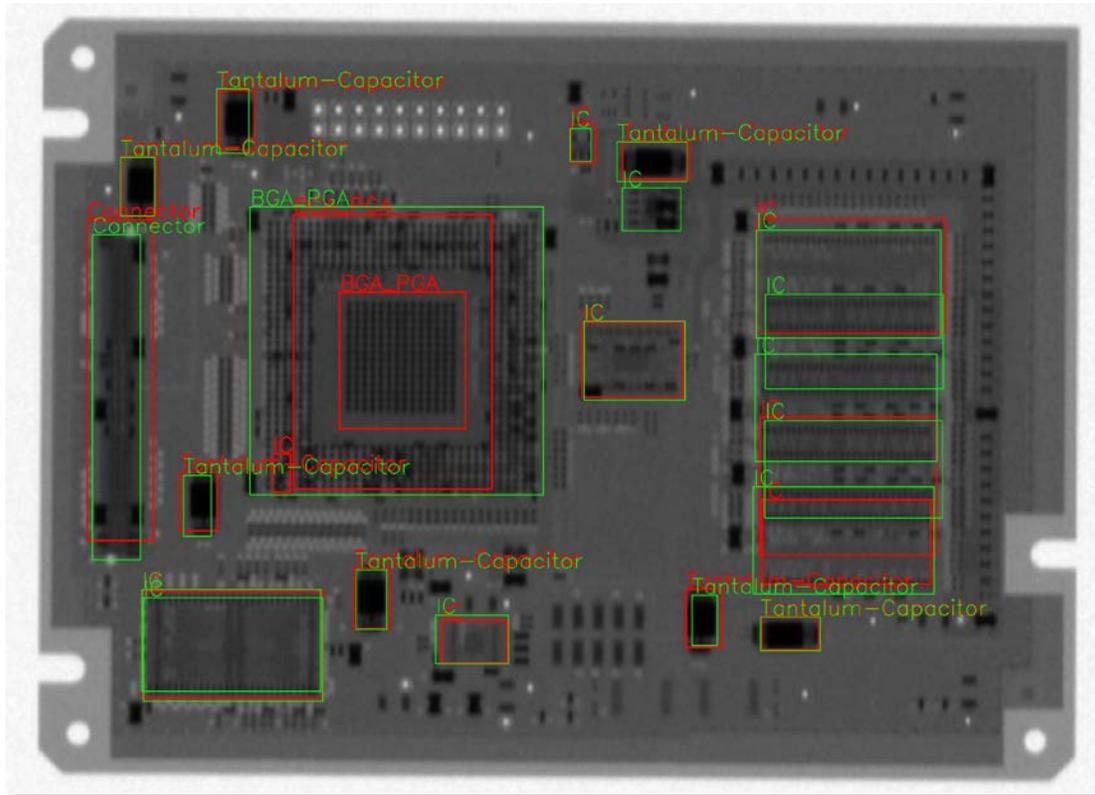
Auswertung Testdatensatz (16 Platinen)

Konfusionsmatrix Komponentendetektion

		Tatsächlich (wahr)				Recall	Precision	F1	
		IC	TC	C	BGA/PGA				Hintergrund (FP)
Vorhersage	IC	165				23	76 %	88 %	82 %
	TC	1	93			14	69 %	86 %	77 %
	C	4		33		14	66 %	65 %	65 %
	BGA/PGA	1			8	2	100 %	73 %	84 %

Ergebnisse

Detektierte Komponenten auf dem Testdatensatz



Beispiel Leiterplatten ID 005 (links) und ID 047 (rechts)

Komponenten Grundwahrheit **grüne Rahmen**; Deep Learning Modell detektierten Komponenten **rote Rahmen**

Ergebnisse

Auswertung Testdatensatz (16 Platinen)

- Wertbestimmungsmodell basierend auf den detektierten Komponenten
 - Mittlerer Wert einer Komponente pro Klasse wird festgelegt:
 - Auswahl eines repräsentativen Probensatzes
 - Chemische Analyse der Proben
 - Ermittelter Wert ist die Summe aller Komponenten aller Klassen
- Optional kann in dieser Summe mit der Größe der Komponenten gewichtet werden
- Sehr flexibel, kann je nach Anwendungsanforderung angepasst werden

Monetäre Bewertung

	IC	TC	C	BGA PGA
Analysierter mittlerer Wert je Komponente	2,6 ct	1,9 ct	5,1 ct	26,5 ct
Zielwert des kompletten Testdatensatzes	5,62 €	2,55 €	2,55 €	2,12 €
Vorhersagewert des kompletten Testdatensatzes	4,89 €	2,05 €	2,60 €	2,92 €

$$v_{tot} = \sum_i n_i v_i$$

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Tiefe neuronale Netze wie die in der Objektdetektion von optischen Bildern eingesetzt werden funktionieren auch mit Röntgenbildern
- Im Rahmen des kleinen verfügbaren Datensatzes sehr vielversprechende Ergebnisse bei der Objektdetektion auf Leiterplatten
- Flexibles Wertbestimmungsmodell erlaubt Anpassung an verschiedene Recyclingfragestellungen

Ausblick

- Erweiterte Wertbestimmungsmodelle, die Größe und Masse der Komponenten berücksichtigen
- Verwendung der Dual-Energy Basismaterialzerlegung der Röntgenbilder
- Neue Komponentenklassen zur Erhöhung der Genauigkeit der Wertbestimmung

Vielen Dank für die
Aufmerksamkeit

Kontakt

Dr. Markus Firsching
Fraunhofer IIS
Tel. +49 911 58061-7568
markus.firsching@iis.fraunhofer.de

Fraunhofer IIS, Bereich EZRT
Flugplatzstr. 75
90768 Fürth
www.iis.fraunhofer.de

