

Ziegelsortierung - Automatisierte hyperspektrale Bildgebung und Bildanalyse für die Sortierung von Ziegel- und Mauerwerksbruch unter Verwendung von Verfahren des maschinellen Lernens

Kurzfassung zum Schlussbericht IGF-Vorhaben Nr. 22068 BG

Essen, den 13. September 2024

1 Hintergrund

Aktuelle Leitstrategien und umweltpolitische Zielsetzungen fordern von den Herstellern mineralischer Bauprodukte zunehmend die Einführung von Stoffkreisläufen. Aus baustofftechnologischer Sicht stellt die zunehmende Heterogenität der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle, die weit mehr als ein Drittel aller in Deutschland und Europa anfallenden Abfallarten ausmachen, ein großes Problem dar. Als Voraussetzung für eine hochwertige Verwertung ist eine ausreichende Sortenreinheit der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle erforderlich. Nur dann ist eine Rückführung in das Ausgangsprodukt möglich. Die zerkleinerten und klassierten Produkte weisen jedoch noch eine relativ hohe Heterogenität auf, weshalb versucht wird, durch manuelle, mechanische und/oder optische Sortierung eine höhere Homogenität zu erreichen. Mechanische Sortierverfahren sind jedoch hinsichtlich der Trennung in verschiedene Rohdichteklassen sehr begrenzt. Daher wird seit einigen Jahren verstärkt an der Entwicklung sensorgestützter optischer Einzelkorn-sortierverfahren geforscht.

2 Zielsetzung

Ziel des Projektes war die Entwicklung einer Erkennungsroutine für unterschiedliche Ziegelarten, die im Ziegel- und Mauerwerkbruch anfallen bzw. als Rezyklat in der Ziegelproduktion eingesetzt werden (Dachziegel, Hochlochziegel, Vormauerziegel, hochgebrannt, niedriggebrannt, usw.) basierend auf bildanalytischen und spektralen Merkmalen unter Anwendung von Verfahren des maschinellen Lernens. Dabei sollen Fremd- und Störstoffe sicher erkannt und aussortiert werden. Es werden verschiedene Fraktionen erzeugt, die den Anforderungen der jeweiligen Verwertung entsprechen (z.B. puzzolanische Reaktivität als Zementhauptbestandteil). Innerhalb dieser sortenreinen Ziegel-Fraktionen wird es wenig schwankende Eigenschaften geben. Aus Gründen der Produktsicherheit wird der Einsatz in der Industrie zunehmen. Aus Ziegel- und Mauerwerksbruch entstehen somit neue Produkte (die einzelnen sortenreinen Fraktionen). Die verbleibenden mineralischen Fraktionen werden möglichst genau definiert, so dass eine Verwertung in der Zukunft möglich ist. Mauerwerkbruch kann sortenrein verwertet werden in R-Beton als Typ 2 oder aufgemahlen als Zementkompositmaterial (bis zu 30 M.-%) oder in Ziegelrohmassen (bis zu 30 M.-%) oder zu Anteilen bis ca. 40 % in Tragschichten ohne Bindemittel.

Die entwickelte intelligente hybride Erkennungsroutine wurde aufgrund der gegebenen Komplexität des Erkennungsproblems mit hoher Variabilität innerhalb der einzelnen Klassen und geringen Unterschieden zwischen den Klassen als hybrider Ansatz unter Verwendung einer Kombination klassischer maschineller Lernverfahren auf Basis spezifischer Farb- und Texturmerkmale entwickelt. Im Projekt wurde sich auf die Erkennung für Ziegelpartikel im Größenbereich 2-8 mm konzentriert.

Projektbegleitend wurde ein Demonstrator, bestehend aus Kamera, Beleuchtung, Zuführung, Vereinzelung und Wägung, zur ziegelsortenspezifischen Sortierung im Labormaßstab entwickelt.

Kernziel des Vorhabens war die Entwicklung der geräte-, software- und erkenntungstechnischen Grundlagen im Labormaßstab, die zu einem späteren Zeitpunkt auf eine größere Sortiermaschine übertragen werden können.

Die ökologischen und ökonomischen Betrachtungen zum Sekundärrohstoff bzw. -produkt wird die Akzeptanz in der Ziegelindustrie erhöhen. Im Projekt wurden Grundlagen für die Entwicklung von effektiveren, optischen Sortierverfahren von Ziegelrestmassen geschaffen mit dem Ziel das sortenreine Recycling von Ziegelrestmassen zu erhöhen.

3 Durchführung und Ergebnisse

3.1 Probenklassifizierung

Der bei der Ziegelproduktion anfallende Brennbruch, wird in Abhängigkeit von der anfallenden Menge, optimal im eigenen Werk aufbereitet und in die Produktion zurückgeführt. Ziel ist es, bei den befragten Unternehmen, den Brennbruch zu minimieren, was hauptsächlich von verfahrens- und keramtechnischen Eigenschaften abhängig ist. Je nach Produktgruppe, Hintermauer-, Dach- und Klinkerziegel, sind unterschiedliche Mengen als Magerungsmittel rückführbar. Im Recyclingsektor sind hauptsächlich Mauerwerkbruch als nicht sortenreines Rezyklat vorhanden, dass entsprechend klassifiziert und ggf. aufbereitet werden kann. Im Projekt wurden folgende Abstraktionsebenen definiert:

- AE 1 neue Ziegel der drei Produktgruppen (Brennbruch)
- AE 2 weitere relevante Baustoffe wie Porenbeton
- AE 3 Rezyklierte Ziegelsorten (rezykliert ohne Anhaftungen)
- AE 4 Modellwände aus Ziegeln mit Mörteln, Putzen
- AE 5 Ziegel- und Mauerwerkbuch aus der Recyclinganlage

Es wurden Proben der unterschiedlichen Abstraktionsebenen zusammengetragen. Recycling-Baustoffe haben eine kontaminierte Oberfläche, was die Nachweis- und Sortierquote verringert, daher werden ungebrauchte und recycelte Materialien in die Untersuchungen einbezogen. Es wurden Proben in den folgenden Kategorien zusammengestellt, charakterisiert und für die Untersuchungen aufbereitet:

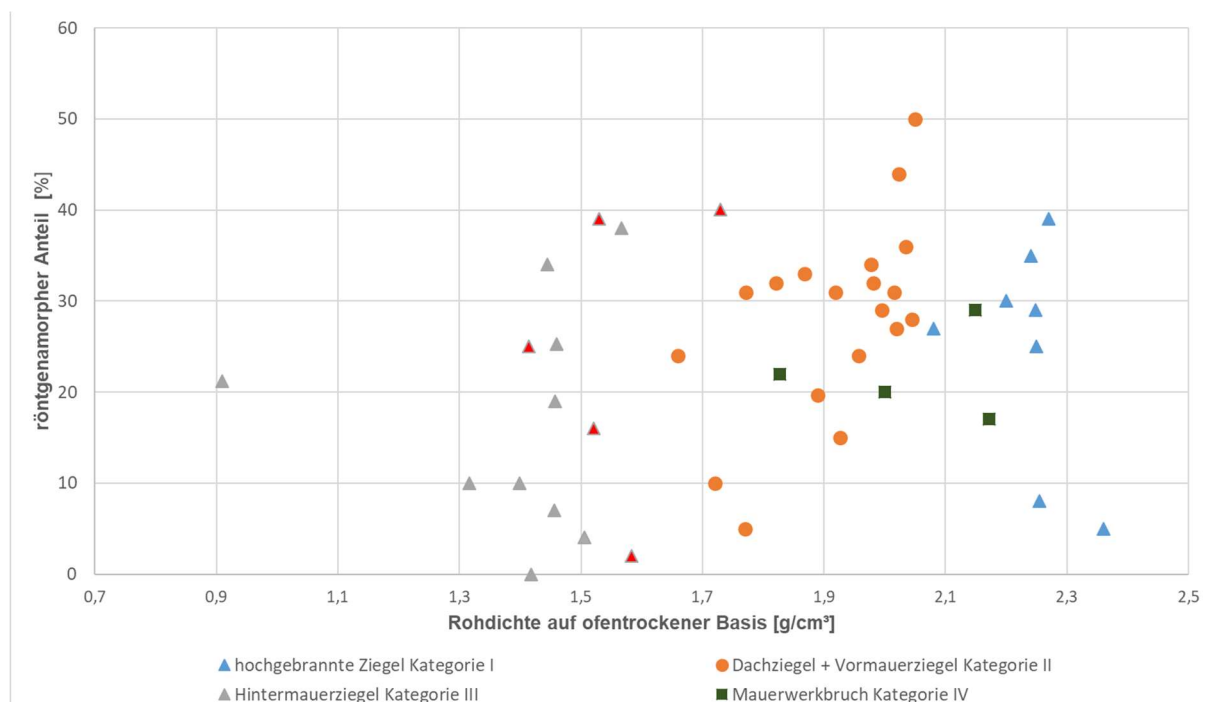
- **Kategorie I:** sortenreines hart gebranntes Material (8 Proben)
- **Kategorie II:** hoch gebranntes, hartes Material – Dachziegel und Mauersteine (Rohdichte $> 2 \text{ g/cm}^3$) (19 Proben)
- **Kategorie III:** niedrig gebranntes, weiches Material – Hochlochziegel (Rohdichte $< 2 \text{ g/cm}^3$) (18 Proben)
- **Kategorie IV:** Mauerwerkbruch (Gemische, 5 Proben)
- **Kategorie V:** Sonstiges / Störstoffe (Beton, Mörtel, Gips, ...) (9 Proben)

In allen Kategorien wurde rezykliertes und neues Material zusammengestellt und in einer Datenbank erfasst.

Es wurden u.a. quantitative Phasenanalysen mittels XRD-Untersuchungen (Röntgenbeugungsanalyse) erstellt. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Quarz, Hämatit und Kalifeldspat konnten in allen Kategorien erkannt werden, während in Kategorie III mehr Mineralien wie Moskovit, Melit, Melilith und Hellglimmer enthalten waren. Der in Abbildung 1 ermittelte röntgenamorphe Anteil wird als potentielle reaktive Phase angesehen. Dabei soll bei ausgewählten Proben die puzzolanischen Eigenschaften ermittelt werden. Als Puzzolane werden wasserbindende Zusatzstoffe bezeichnet, die in Verbindung mit Calciumhydroxid und Wasser hydraulisch abbinden und erhärten.

Tabelle 1: Ergebnisse der quantitativen Phasenanalyse mittels XRD

	Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III	Kategorie IV	Kategorie V
Quarz	✓	✓	✓	✓	✓
Hämatit	✓	✓	✓	✓	✓
Kalifeldspat	✓	✓	✓	✓	✓
Mullit	✓	✓			
Plagioklas		✓	✓	✓	
Calcit		✓	✓	✓	
Moskovit			✓		
Melit			✓		
Melilith			✓		
Hellglimmer			✓		



3.2 Versuchsanlage

Für die Versuchsanlage wurde ein Einzeltransport von Proben über eine einzige Förderspur gewählt. Der lineare Vibrationsförderer wurde aufgrund seiner Fähigkeit ausgewählt, Ziegelpartikel im angegebenen Größenbereich effizient zu transportieren und zu trennen. Das entstandene Laborgerät gewährleistet eine gleichmäßige und präzise Zuführung der Partikel und optimiert den nachgeschalteten Bildgebungs- und Analyseprozess (Abbildung 2). Für die Bildaufnahmen wurde eine hochauflösende Industrie-Matrixkamera mit variierbarer Beleuchtung (Ringlicht und Auflicht) verwendet. Durch die durchgeführten Anpassungen am Design des Demonstrators werden die Effizienz und Genauigkeit der Probenanalyse optimiert.



Abbildung 2: Angepasster Demonstrator zur Sortierung von Ziegelpartikeln im Größenbereich von 2-8 mm

3.3 Ergebnisse

Das Modell wurde anhand bekannter Proben aus dem gesammelten Materialpool evaluiert, um seine Effizienz bei der Erkennung und Sortierung von Mauerwerkbruch in verschiedene Kategorien zu bewerten. Für die Bewertung wurde eine durchschnittliche Erkennungsrate (ER) mit Standardabweichung berechnet (Abbildung 3). Wie die Grafik zeigt, wurde eine durchschnittliche ER von 97,82 % erreicht. Auch die Erkennung einzelner Klassen ist mit über 95% sehr gut. Die sehr geringe Standardabweichung deutet darauf hin, dass der Klassifikator mit hoher Stabilität arbeitet. Für die Sortierleistung am Demonstrator ergaben sich sehr gute Ergebnisse mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von ca. 90 % (Abbildung 4). Die Genauigkeit für Kategorie III war jedoch deutlich geringer, was hauptsächlich auf die Ähnlichkeit der Farbmerkmale mit denen der zweiten Klasse zurückzuführen ist. Externe Faktoren trugen ebenfalls zur Verringerung der Genauigkeit bei, wie z.B. Staubpartikel, Störungen durch externe Beleuchtung und Verzögerungen beim Betrieb des Sortiermechanismus des Demonstrators.

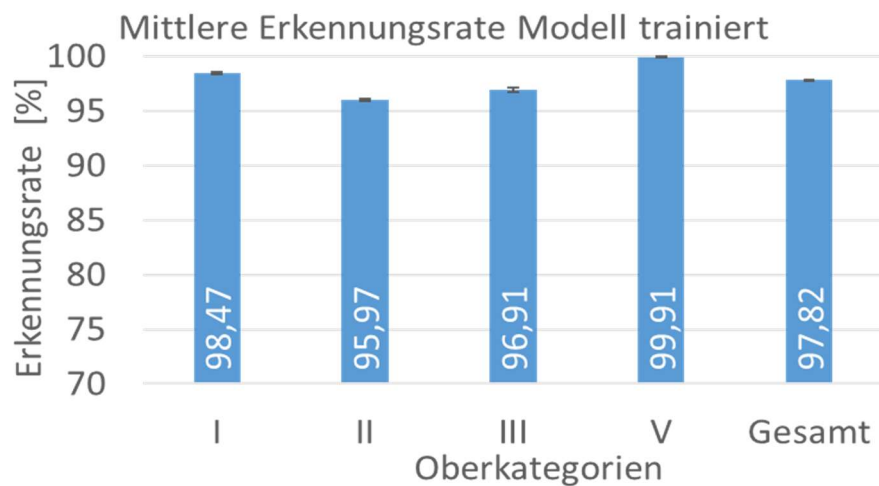


Abbildung 3: Mittlere Erkennungsraten (ER) und Standardabweichungen für die betrachteten Oberkategorien – theoretisch am Klassifikator ermittelte ER

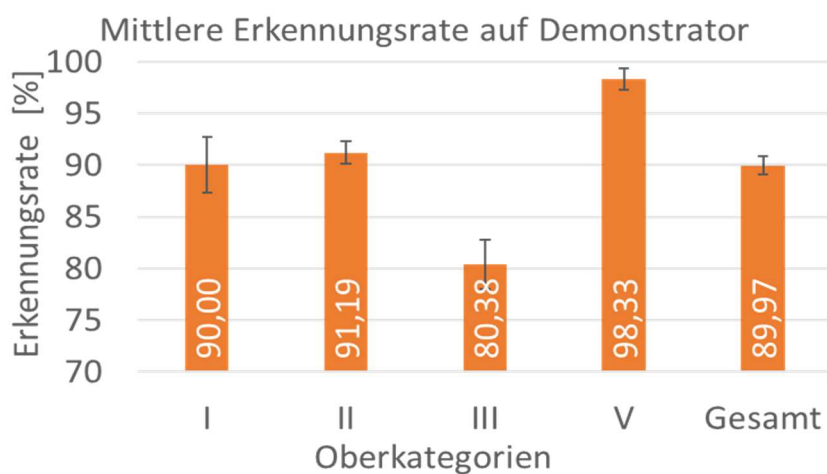


Abbildung 4: Mittlere Erkennungsraten (ER) und Standardabweichungen für die betrachteten Oberkategorien – realistisch erreichte Sortierraten am Demonstrator (rechts)

4 Zusammenfassung

Die entwickelte Erkennungsalgorithmik zeigt sehr gute Ergebnisse bei der automatisierten, sensorgestützten Unterscheidung / Sortierung von verschiedenen Ziegelarten. Insbesondere bei der Identifizierung von Fremdmaterialien (Kategorie V) innerhalb der Chargen wurden Erkennungsraten > 98 % ermittelt. Trotz der komplexen Herausforderung, zwischen sortenreinem, hart gebranntem Material (Kategorie I), hoch gebranntem, hartem Material – Dachziegel und Mauersteine (Kategorie II) und niedrig gebranntem, weicherem Material (Kategorie III) zu unterscheiden, erreichte der Klassifikator für alle Kategorien Erkennungsraten > 90 % und einen F1-Score von über 80 % für alle Materialklassen. Diese Genauigkeit belegt die Robustheit des gewählten Ansatzes, insbesondere in einer kontrollierten Laborumgebung.

Mehrere Herausforderungen traten während des Sortierungsprozesses auf. Das größte Problem war die Unterscheidung zwischen Ziegeltypen mit ähnlichen spektralen Eigenschaften, insbesondere zwischen dicht gebranntem Material (Kategorie II) und niedrig gebranntem, weicherem Material (Kategorie III). Diese Ähnlichkeiten führten häufig zu Fehlklassifikationen, was die Gesamteffektivität des Systems in realen Szenarien verringerte. Zusätzlich ist das hyperspektrale Bildgebungssystem empfindlich gegenüber Umweltfaktoren wie inkonsistenter Beleuchtung, die gelegentlich die Bildqualität verschlechterte und

zu Klassifikationsfehlern beitrug. Um die identifizierten Herausforderungen zu bewältigen, können mehrere Verbesserungen implementiert werden. Ein Upgrade auf eine hyperspektrale Kamera mit höherer Auflösung und Sensitivität könnte die Fähigkeit des Systems verbessern, feine Unterschiede in Textur und Materialzusammensetzung zu erfassen, wodurch die Klassifikationsgenauigkeit erhöht wird. Darüber hinaus könnte eine Verfeinerung des Beleuchtungssystems, um eine konsistente Beleuchtung in allen Bildgebungsszenarien sicherstellen, die Auswirkungen von äußeren Einflussgrößen auf die Bildqualität zu verringern. Weiterhin könnte die Verbesserung der maschinellen Lernalgorithmen, um besser auf Variationen in den Ziegelmerkmalen und Umgebungsbedingungen zu reagieren, zu einem widerstandsfähigeren und zuverlässigeren Sortiersystem führen. Diese Verbesserungen könnten den Weg für die Skalierung der Technologie auf industrielle Anwendungen ebnen und sie zu einem wertvollen Werkzeug für nachhaltige Baupraktiken machen.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages