

Automatisierte Sortieranalyse für rezyklierte Gesteinskörnungen

E. Linß¹; D. Garten²; A. Karrasch³; K. Anding⁴; P. Kuritcyn⁴

¹ Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar, Weimar

² GFE Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V., Schmalkalden

³ LLA Instruments GmbH & Co. KG, Berlin

⁴ Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Qualitätssicherung und Industrielle Bildverarbeitung, Ilmenau

1. Einleitung

Die Bauschuttfraktion ist mit rund 58 Millionen Tonnen neben Boden und Steinen eine der größten Abfallströme in Deutschland (Abbildung 1). Gleichzeitig ist der recycelte Anteil für die Herstellung hochwertiger Materialien wie Recyclingbeton und -asphalt mit 21 % noch relativ gering, wobei der Anteil, welcher in Recyclingasphalt verwertet wird, um einiges höher einzuschätzen ist. Schätzungsweise fließen ca. 5-10 % der Recycling-Baustoffe zurück in den Hochbau (Abbildung 2). Bei Mauerwerkbruch ist aufgrund der hohen Heterogenität und der mineralischen Beimischungen die Verwertung erschwert, sodass die niedrigsten Recyclingraten erreicht werden. Die Materialien aus dem Rückbau von Gebäuden können in ihrer Materialzusammensetzung je nach Herkunft, Art des Rückbaus und der Verarbeitung sehr heterogen sein.

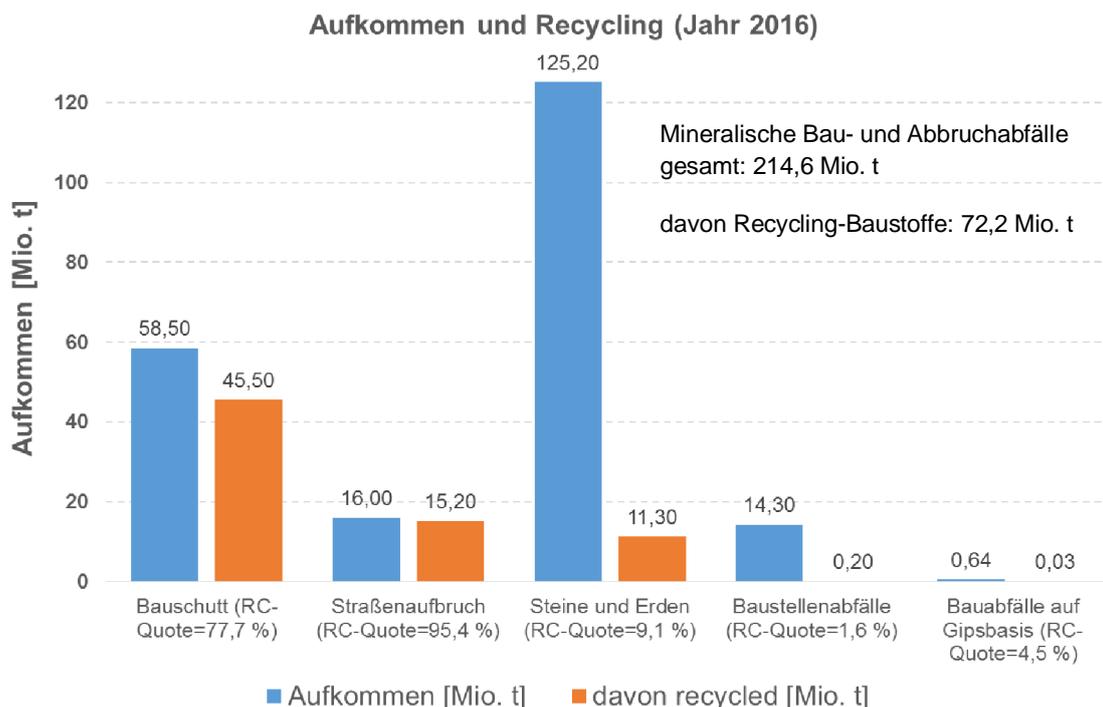


Abbildung 1: Mineralische Bau- und Abbruchabfälle in Deutschland im Jahr 2016 [1]

Rezyklierte Gesteinskörnungen werden im Rahmen der Fremd- und Eigenüberwachung neben anderen stofflichen Parametern auch hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung charakterisiert. Die Sortieranalyse ist in DIN EN 933-11 [2] beschrieben und wird händisch vorgenommen. Diese Prozedur ist sehr zeitaufwändig, stark subjektiv geprägt und hinsichtlich der geprüften Probenmengen nicht repräsentativ [3]. Anhand der stofflichen Zusammensetzung werden die Verwertungsmöglichkeiten bzw. mögliche Einsatzgebiete nach DIN EN 12620 [4] und DIN 4226-101 [5]

oder anderen Regelwerken aus dem Straßenbau definiert. Die Güteüberwachung ist die Voraussetzung zur Erlangung des Produktstatus. Güteüberwachte Produkte haben am Markt bessere Chancen und führen somit zu einem Imagegewinn für die Baustoffrecyclingbranche und zu einer besseren Ausnutzung gegebener Ressourcen. Dafür werden Verfahren für die Analytik für rezyklierte Gesteinskörnungen benötigt, die präzise, schnelle und vor allem repräsentative Ergebnisse liefern.

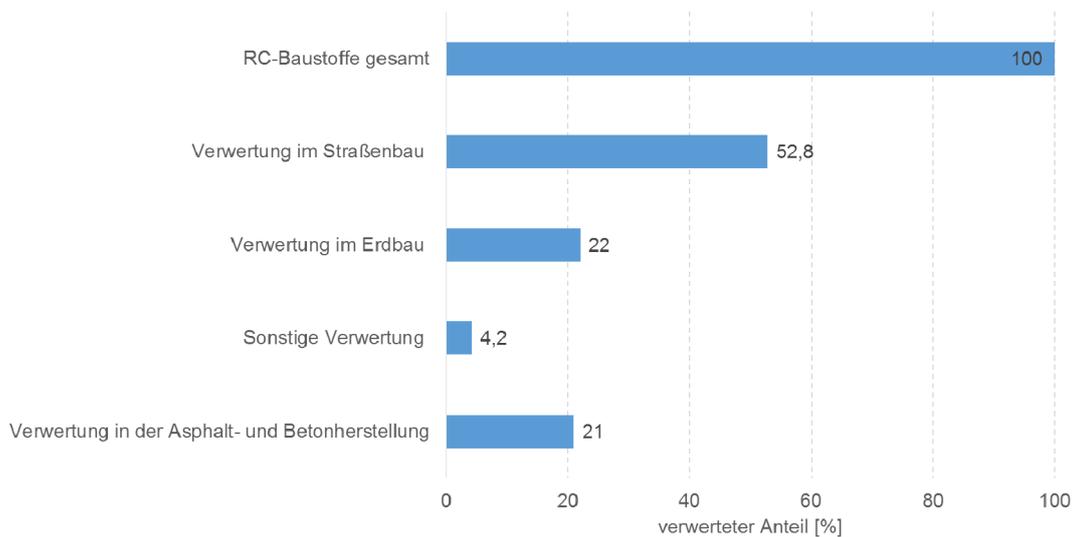


Abbildung 2: Anteilige Verwertung der 72,2 Mio. t Recycling-Baustoffe in Deutschland im Jahr 2016 [1]

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden die Grundlagen für ein neues Analyseverfahren zur Qualitätssicherung und Identifikation von mineralischen Bau- und Abbruchabfallgemischen auf der Grundlage optischer Mustererkennungsverfahren entwickelt, welches den Anforderungen der DIN EN 12620 hinsichtlich der zu unterscheidenden Bauschuttklassen gerecht wird [6]. Das Forschungsziel bestand darin, ein sensorgestütztes Erkennungsverfahren für die Qualitätssicherung rezyklierter Gesteinskörnungen, wie beispielsweise aufgeschlossenen Beton- und Mauerwerkbruch für den Labormaßstab zu entwickeln und zu erproben (Abbildung 3).



Abbildung 3: Darstellung des Projektziels

Dabei lag der Fokus auf der Zusammenführung von Untersuchungen zur Erkennung / Unterscheidung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in verschiedenen Spektralbereichen (SWIR, VIS) unter Verwendung geeigneter Bildmerkmale aus hochaufgelösten Bildern. Die Anforderungen an die Erkennungsgenauigkeit bei der Analytik sind noch um einiges höher als bei einer Aussortierung nur einzelner Störstoffe, weshalb eine Kopplung der beiden Spektralbereiche unter Fusion der orts aufgelösten Hyperspektralinformation im visuellen (VIS) und kurzwelligigen infraroten (SWIR) Spektralbereich angestrebt wurde (Abbildung 4). Für die Unterscheidbarkeit der Baumaterialien wurden folgende Wellenlängenbereiche untersucht:

- VIS-Spektralbereich: 400 -700 nm und
- SWIR-Spektralbereich: (700) 1000 – 2500 nm.

Beide Spektralbereiche sind für die Unterscheidung von rezyklierten Gesteinskörnungen sehr gut geeignet, stoßen aber einzeln angewendet bei bestimmten Materialkombinationen an ihre Grenzen. Die Zusammenführung beider Informationen, sowohl aus dem infrarotem als auch aus dem visuellen Spektrum unter Verwendung orts aufgelöster Informationen bringt einen hohen Informationszuwachs und ermöglicht, die Erkennungsaufgabe mit deutlich höherer Erkennungssicherheit zu lösen.

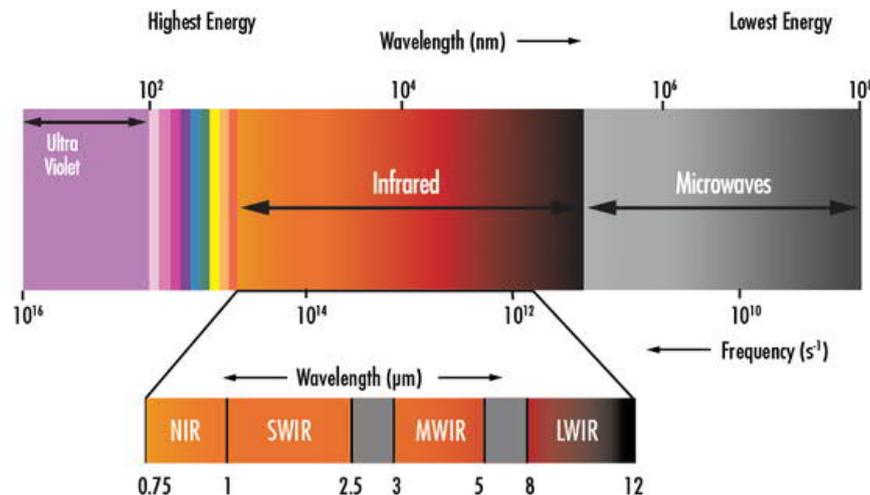


Abbildung 4: Elektromagnetisches Spektrum und Aufteilung des infraroten Spektralbereichs [6]

2. Untersuchungen zur Entwicklung einer automatisierten und sensorgestützten Sortieranalyse von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen

2.1 Probematerial

Bei der Zusammenstellung von Probematerial wurde sich an den in der DIN EN 12620 vorgegebenen Oberklassen orientiert und diese wurden entsprechend in Unterklassen eingeteilt (Tabelle 1). Dabei wurde auf eine möglichst große Variationsbreite innerhalb der einzelnen Bauschuttkategorien geachtet. Es wurden neue und rezyklierte Materialien in die Probensammlung einbezogen. Insgesamt wurden 175 Proben zusammengestellt und hinsichtlich der baustofflichen Parameter Rein- und Rohdichte, Wasseraufnahme und punktuell der mineralogischen Zusammensetzung analysiert (Abbildung 5). Für die Untersuchungen wurden Partikel der Größe 8/16 mm verwendet. Daraus wurden im weiteren Verlauf definierte Gemische hergestellt.

Tabelle 1: Definierte Bauschuttkategorien und deren Unterklassen

Rc 1	Beton, Betonprodukte, Mauersteine aus Beton
Rc 2	Mörtel
Ru 1	Naturstein
Ru 2	ungeb. Gesteinskörnungen, hydraul. geb. Gesteinskörnung (Leichtbeton)
Rb 1	Ziegel
Rb 2	Mauersteine (Ziegel) porosiert und dicht gebrannt
Rb 3	Kalksandstein
Rb 4	nicht schwimmender Porenbeton
Ra 1	Asphalt
Ra 2	Teerpappe
Ra 3	Dachbahnen
Rg 1	Glas
X 1	Ton und Boden
X 2	NE-Metallschlacke
X 3	Gips
X 4	Gummi
X 5	Plastik
X 6	Metalle
X 7	nicht schw. Holz
X 8	organ. Material
X 9	Papier
X 10	Sonstiges
Y 1	schwimmender Porenbeton
Y 2	schwimmendes Holz
Y 3	Styropor / Polysterol
Z 1	Verbundpartikel

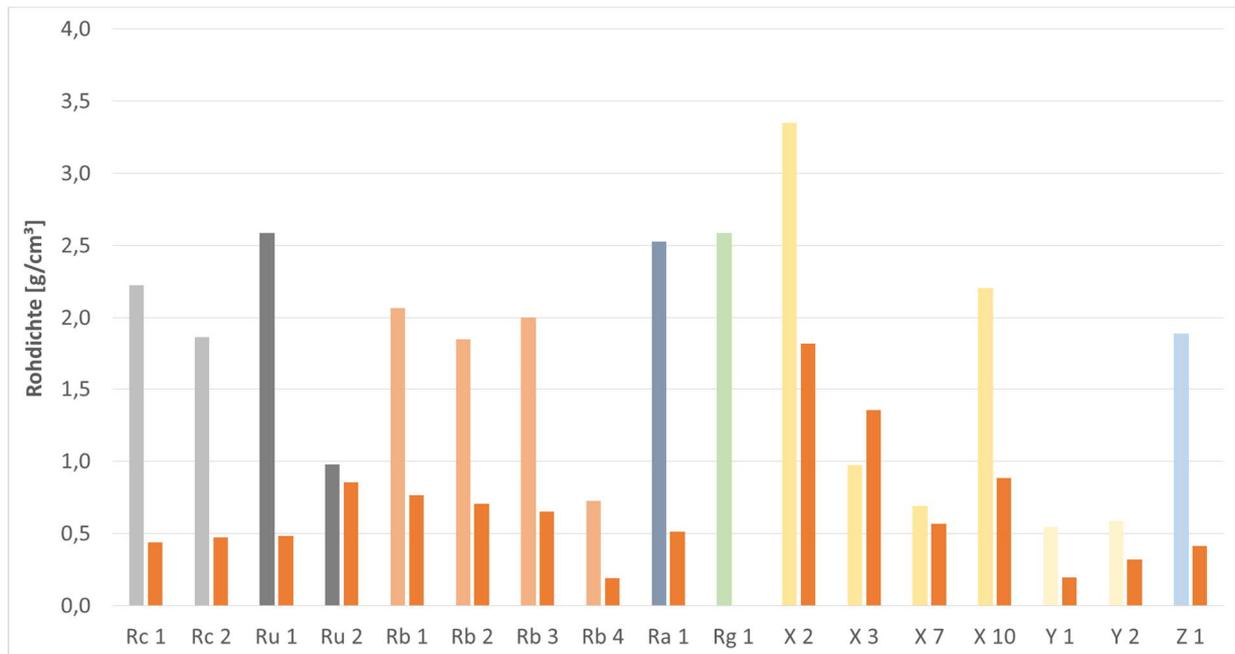


Abbildung 5: Mittelwerte und Spannweite der Rohdichte für die einzelnen Bauschuttkategorien (Bezeichnung der Klassen siehe Tabelle 1)

2.2 Entwicklung und Aufbau eines Demonstrators

Innerhalb des Projektes wurde von den beteiligten Firmen ein Demonstrator aufgebaut, welcher aus dem Grundgestell aus Profilmaterial und den Komponenten Kamera, Beleuchtung, Vibrationsförderer, Absaugeinrichtung besteht (Abbildung 6). Die Steuerung und die Spannungsversorgung sind in einem Schaltschrank untergebracht, um eine sichere Verwendung unter Einhaltung der arbeitsschutzrechtlichen Anforderungen zu gewährleisten. Die Aufnahme der Partikel erfolgte im freien Fall an der Abwurfkante in einem 400 mm Bildfeld. Die beiden verwendeten Hyperspektralkameras im VIS- und NIR-Bereich der Firma LLA Instruments GmbH wurden so konzipiert, dass sie auf einen gemeinsamen Messpunkt ausgerichtet sind. Für die NIR-Hyperspektralkamera

ergibt sich eine Ortsauflösung von 1,25 mm x 2,08 mm und für die VIS Hyperspektralkamera eine Ortsauflösung von 1,25 mm x 1,25 mm. Die maximale Bildwiederholrate beträgt 270 s^{-1} .

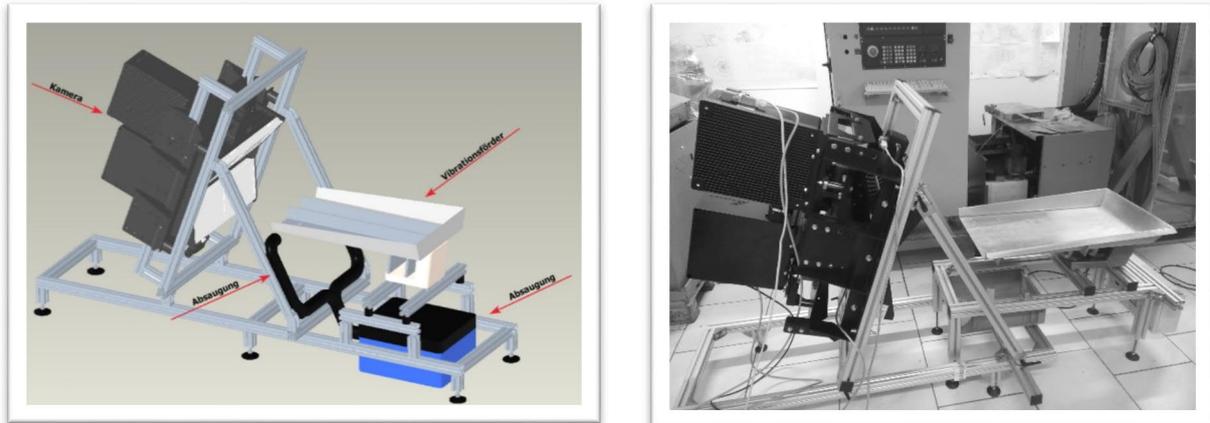


Abbildung 6: Konstruktion und Foto des aufgebauten Prototyps

Die Partikel werden auf den stufenlos regelbaren Vibrationsförderer aufgegeben und werden zur Abwurfkante transportiert. Es können ca. 1 kg / 1 Min. gut vereinzelt und gescannt werden. Für einen Probenumfang von 10 kg werden also 10 Minuten benötigt, was gegenüber der händischen Sortieranalyse eine wesentliche Verbesserung darstellt. Für die händische Sortierung wird für 10 kg ca. 1 h benötigt.

2.3 Untersuchungen & Ergebnisse

2.3.1 Voruntersuchungen zu schwierig zu unterscheidenden Bauschuttkategorien mittels CT-Bild-Auswertung an einzelnen Proben

Zusätzlich wurden von einigen ausgewählten Baustoffen, die hinsichtlich ihrer Porosität bewertet werden sollen, wie beispielsweise Mörtel, Porenbeton und Ziegel Aufnahmen mittels Computertomograph – nanotom m „research edition“ (CT) an der Bauhaus-Universität Weimar angefertigt. Mit dem Gerät ist es möglich, geometrische Strukturen von Werkstoffen als Bilddaten hochaufgelöst zu ermitteln, welche mit Verfahren der automatischen Bilddatenverarbeitung in Simulationsmodelle transferiert werden können. Die CT-Bilder sind exemplarisch für schwimmenden und nicht schwimmenden Porenbeton in Abbildung 7 dargestellt. Es sollte untersucht werden, ob das in der DIN EN 933-11 angegebene schwimmende Material vom nicht schwimmenden Material optisch unterschieden werden kann und welche Texturmerkmale besonders gut für diese Unterscheidung geeignet sind. Dazu wurden Untersuchungen zu Korrelationen zwischen der Rohdichte und der Oberflächenporosität und den optischen 2-D-Texturmerkmalen durchgeführt. Die CT-Bilddaten wurden dafür in die Bildverarbeitungssoftware HALCON [8] eingelesen und 174 verschiedene Merkmalsvektoren berechnet. Für die Materialien Mörtel, Porenbeton und Ziegel wurden jeweils zwei Proben mit unterschiedlicher Rohdichte / Oberflächentextur miteinander verglichen. Aus den 174 Merkmalsvektoren wurden zehn signifikante Merkmale herausgefiltert. Für Ziegel und Mörtel ergaben sich ähnliche Aussagen. Für die Unterscheidbarkeit von schwimmenden und nicht schwimmenden Materialien sind hauptsächlich die Texturmerkmale mit der Bezeichnung rotationsinvariante Momente c_1 - c_7 geeignet. Formkennwerte sind für die Unterscheidbarkeit nicht geeignet. In der Auswertalgorithmik sollte sich demnach stark auf die rotationsinvarianten Momente konzentriert werden.

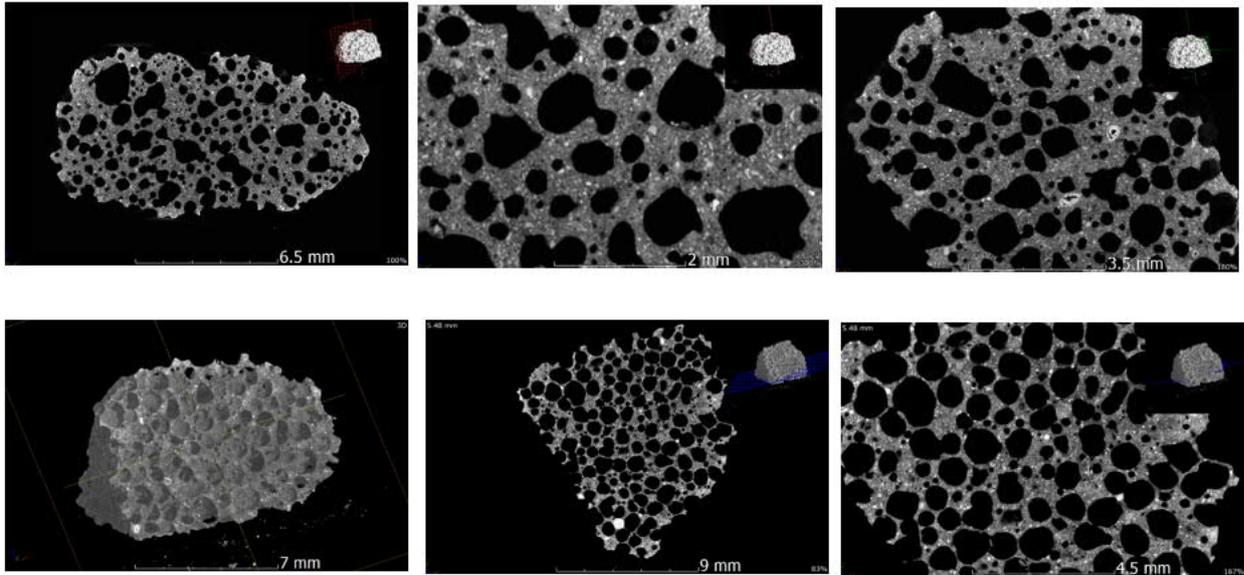


Abbildung 7: CT- Aufnahmen von zwei verschiedenen Porenbetonproben (oben: Nicht schwimmender Porenbeton Probe 1, ungebraucht, $\rho=0,64 \text{ g/cm}^3$; unten: Schwimmender Porenbeton Probe 3, ungebraucht, $\rho=0,47 \text{ g/cm}^3$)

2.3.2 Untersuchungen im VIS- und SWIR-Spektralbereich und Bildauswertung der hochauflösten Bilder

Die aufgenommenen Spektren im Bereich 400-950 nm sind in Abbildung 8 und die Spektren im Bereich 1100 – 2100 nm sind in Abbildung 9 dargestellt.

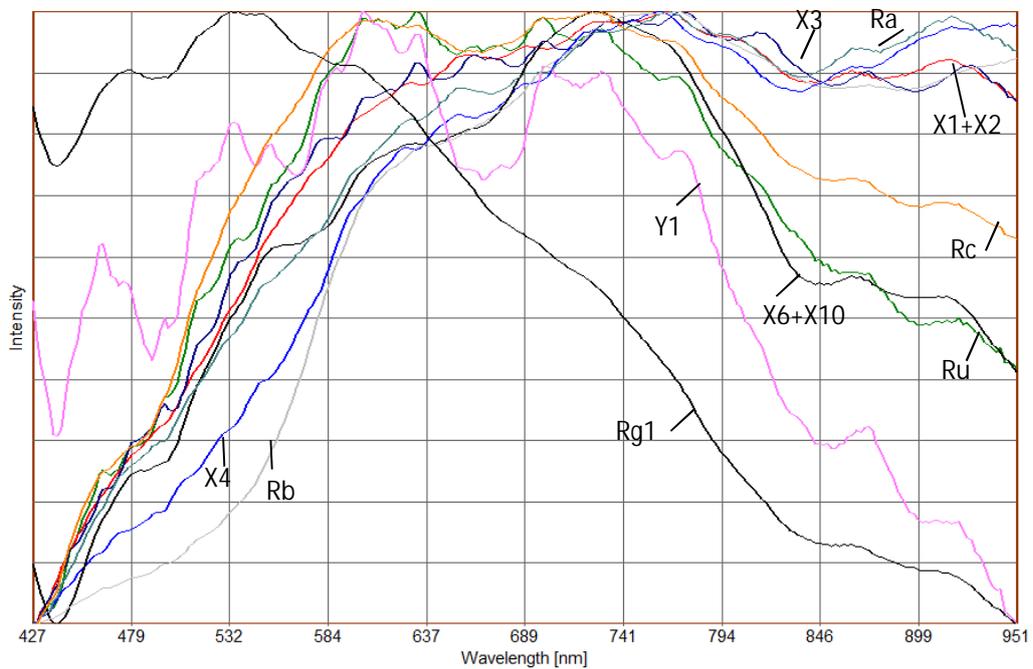


Abbildung 8: VIS-Mittelwertspektren ausgewählter Baustoffkategorien in relativer Darstellung (Bezeichnung der Klassen siehe Tabelle 1)

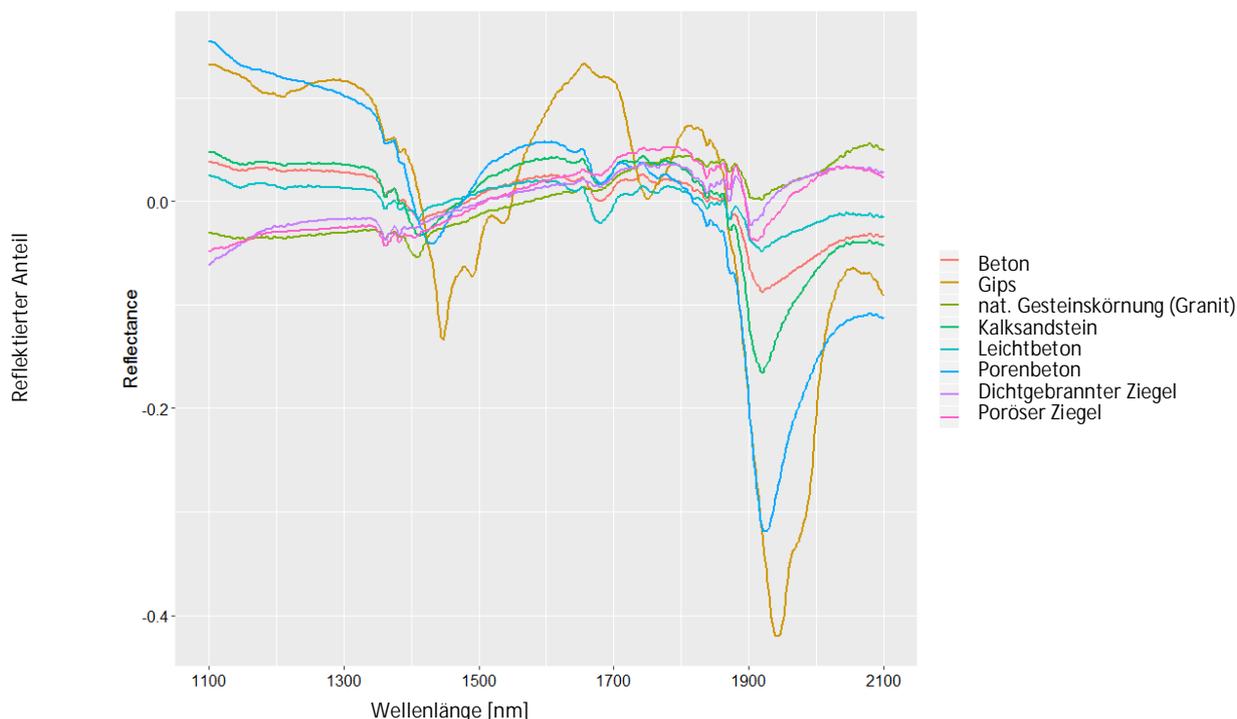


Abbildung 9: Beispiele für SWIR-Spektren einiger Baustoffe (zentrierte und gemittelte Darstellung)

Anhand der aufgenommenen hyperspektralen Messdaten wurden Lern- und Testsets erstellt, die zum Trainieren der Klassifikatoren und anschließendem Testen der Klassifikation genutzt wurden. Zusätzlich wurden für die Proben repräsentative Objektmittelwertspektren erstellt, um systematische spektrale Unterschiede zwischen den Klassen gemäß DIN EN 12620 zu ermitteln. In die Bediensoftware wurde eine Schnittstelle integriert, welche die spektralen Daten an HALCON [8] weitergibt.

Die gewonnenen Spektren wurden mittels Hauptkomponentenanalyse in die Hauptkomponenten umgewandelt. Aus der großen Menge von Bildmerkmale wurden die am besten geeigneten mittels des Merkmalsselektionsverfahrens - InfoGain-Filter gewählt und in Kombination mit den Hauptkomponenten der Spektren für Training und Test des ausgewählten und optimierten Klassifikators Support-Vektor-Maschine (SVM) mit polynomialen Kern verwendet. Abbildung 10 zeigt die ermittelten Erkennungsraten unter Anwendung des Klassifikators SVM mit polynomialen Kern auf den verschiedenen Kombinationen von Bild- und Spektralmerkmalen für den VIS-SWIR-Datensatz. Die besten Ergebnisse (Erkennungsrate um 99,14%) wurden unter Anwendung von 65 Hauptkomponenten und 20 Bildmerkmalen erreicht. Eine größere Anzahl an Bildmerkmalen und Hauptkomponenten führt zu einer Verschlechterung der Erkennungsleistung aufgrund von redundanten und irrelevanten Informationen.

Für ofentrockene sortenreine Rezyklate wurde eine an die Erkennungsaufgabe optimierte Routine entwickelt, mit welcher Erkennungsraten von mehr als 95 % erreicht werden können. Die Ergebnisse der zwei am besten getesteten Klassifikatormodelle (relevanter Merkmalsatz + optimierte Klassifikatorparameter) auf einem physisch abgetrennten und unabhängig vom Lerndatensatz aufgenommenen Testdatensatz sind in Abbildung 11 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass lediglich die Klassen: Ru (Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung), Ra (Bitumenhaltige Materialien) und Rg (Glas) eine klassenspezifische Erken-

nungsrate von weniger als 98 % aufweisen. Dies ist insbesondere auf die Heterogenität der beiden erstgenannten Klassen sowie auf die Transparenz der Materialien in Klasse Rg zurückzuführen.

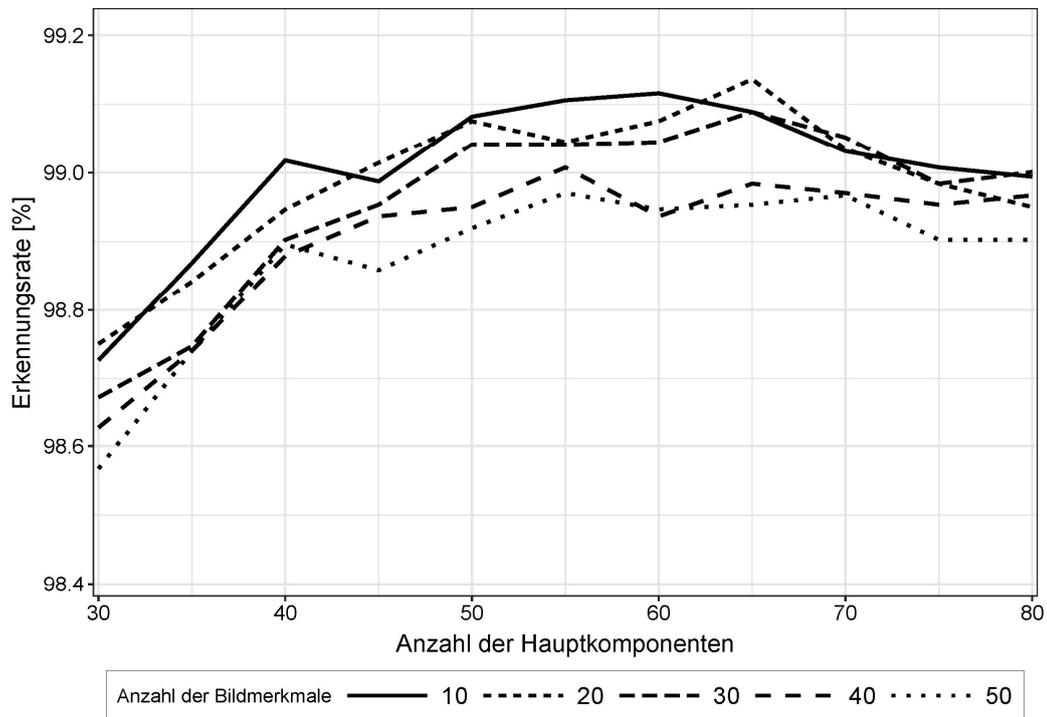


Abbildung 10: Erkennungsraten basierend auf dem VIS-NIR-Datensatz unter Anwendung des SVM Klassifikators (polynomialer Kern)

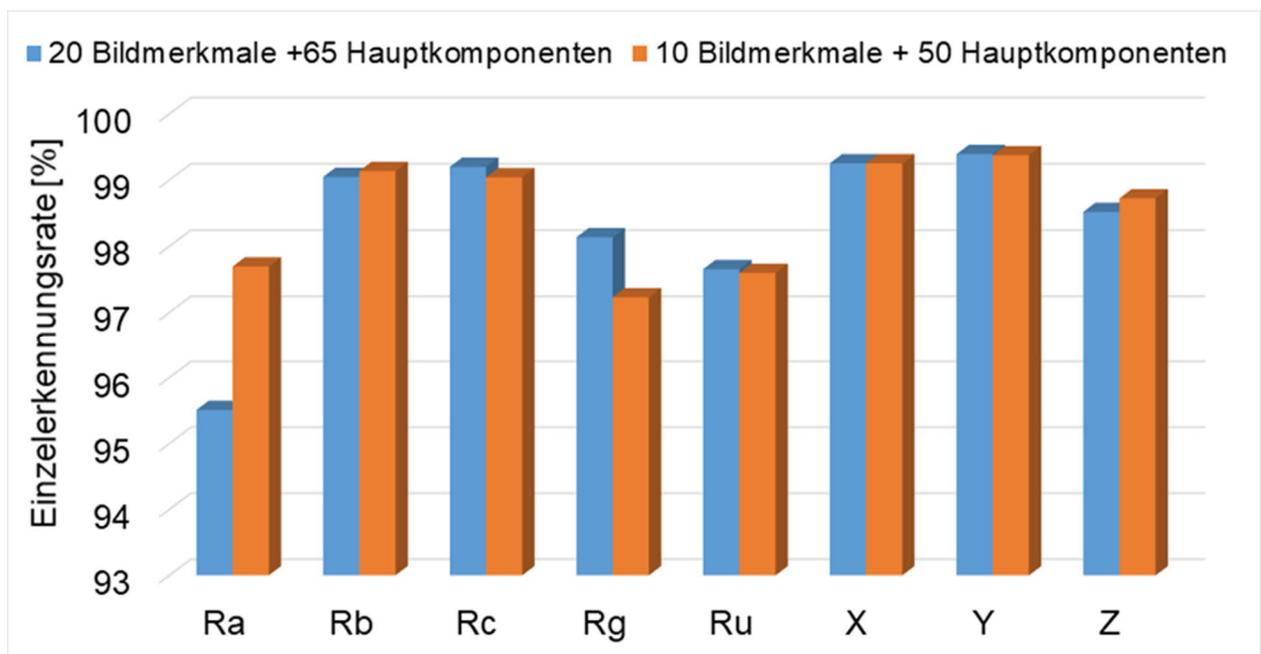


Abbildung 11: Leistung des Systems auf ofentrockenen sortenreinen Bauschuttproben zur Evaluierung der Erkennungsroutine

3. Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt wurde für rezyklierte Gesteinskörnungen eine parallele Bild- und Spektrenaufnahme im freien Fall realisiert. Dafür wurde ein an das Erkennungsproblem angepasster Demonstrator aufgebaut. Es erfolgte die Berechnung von 200 Merkmalen durch HALCON aus den Bildern (Kontur-, Farb- und Texturmerkmale) sowie die Aufnahme der Spektren im VIS- und SWIR-Bereich. Für die Merkmalsreduktion wurden multivariate Datenanalyseverfahren (z.B. InfoGain, chiSquare, Principal Component Analysis, ReliefF) angewendet, wobei sich die besten Ergebnisse bei den Bildern mit der Information-Gain-Merkmalsauswahl und bei den Spektren mit der Principle Component Analysis (PCA) ergaben. Der daraus gebildete Merkmalsvektor besteht aus 115 Bild- und Spektralinformationen und wurde zum Anlernen von verschiedenen Klassifikatoren genutzt. Als am besten geeigneter Klassifikator ergab sich für das beschriebene Erkennungsproblem die SVM mit Polynomkern. Abschließend kann festgestellt werden, dass die Kopplung der Bild- und Spektralinformationen zu einer wesentlichen Steigerung der Erkennungsraten der geprüften Materialklassen führt.

Die händische Sortierung ist stark subjektiv geprägt und weist teilweise große Ungenauigkeiten auf. Mit dem neu entwickelten Verfahren könnten die teilweise großen Ungenauigkeiten der händischen Sortieranalyse mit Variationskoeffizient zwischen 20 und 160 % deutlich gesenkt werden. Aus den Untersuchungen an sortenreinen ofentrockenen Baustoffen ergab sich ein Variationskoeffizient von ca. 3,5 %.

Zukünftig sind die Untersuchungen zum Einfluss von Probenfeuchte und Oberflächenverschmutzung der Rezyklate fortzuführen und in die Erkennungsroutine zu integrieren. Ebenso ist die Erkennung von Praxismischungen noch genauer zu betrachten und die Wiederholrate zu bestimmen. Dafür sollte das Verfahren jedoch vor allem noch praktikabler gestaltet werden. Um die erreichbaren Erkennungsraten auch für kritische Klassen noch weiter zu erhöhen, sollte zukünftig auch auf höher auflösende Hyperspektralsensoren zurückgegriffen werden.

Danksagung

Unser Dank gilt der AiF für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes.

Literatur

- [1] Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016, 2018
- [2] DIN EN 933-11: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober recycelter Gesteinskörnung. Mai 2011
- [3] Linß, E.; Garten, D.; Karrasch, A.; Kuritcyn, P.; Anding, K.: Analyseverfahren zur automatisierten Qualitätssicherung für rezyklierte Gesteinskörnungen auf Basis hyperspektraler Bildinformationen im VIS und NIR, 20. Internationale Baustofftagung ibausil in Weimar, 12. - 14. September 2018
- [4] DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008, Juli 2008
- [5] DIN 4226-101: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen. August 2017
- [6] AiF-ZIM Forschungsprojekt „Analyseverfahren zur automatisierten Qualitätssicherung für rezyklierte Gesteinskörnungen auf Basis hyperspektraler Bildinformationen im VIS und NIR“ (AiF-Nummer: 4144903GR6), Endbericht
- [7] <https://www.edmundoptics.de/resources/application-notes/imaging/what-is-swir>; aufgerufen am 29.6.19
- [8] Bildverarbeitungssoftware HALCON von MVTec Software GmbH