

**Dr.-Ing. Elske Linß**

## **Sensorgestützte Sortierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen**

Mein Dank gilt der AiF für die finanzielle Förderungen der Forschungsprojekte, in denen die Ergebnisse erarbeitet wurden. Weiterhin danke ich allen Projekt- und Forschungspartnern für die sehr gute Zusammenarbeit.

### **Gliederung**

1. Motivation
2. Darstellung des derzeitigen Forschungs- und Wissenstandes in der sensorgestützten Sortierung von Mineralien und mineralischen Bau- und Abbruchabfällen
  - 2.1 Sortierung von Mineralien
  - 2.2 Sortierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen
3. Eigene Untersuchungen zur Entwicklung einer sensorgestützten Sortierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen
  - 3.1 Probenmaterial
  - 3.2 Untersuchungen im VIS-Spektrum
  - 3.3 Untersuchungen im IR- und NIR-Spektrum
  - 3.4 Entwicklung eines Prototyps für die NIR-Sortierung
  - 3.5 Untersuchung von Einflussgrößen auf die NIR-Sortierung
4. Zusammenfassung und Ausblick

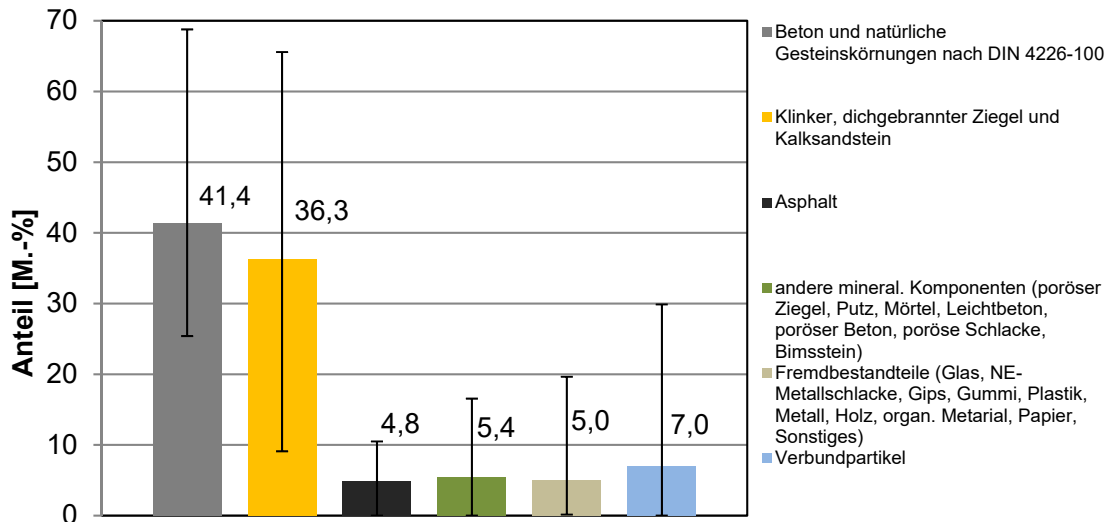
### **1. Motivation**

Mineralische Bau- und Abbruchabfälle sind heterogene Mischungen aus einer Vielzahl an möglichen Materialien, wie beispielsweise Ziegel, Beton, Kalksandstein, Porenbeton, Leichtbeton, Mörtel, Putz, Dämmmaterial, Holz, Plastik, Gips und organischen Bestandteilen. Auch nach der Aufbereitung - mittels Vorsortierung von Hand, ein- oder zweistufiger Zerkleinerung, Abtrennung der Bewehrung durch einen Magnetabscheider, Windsichtung zur Abtrennung von leichten Komponenten und Siebung – liegt das Recyclingprodukt häufig noch heterogen vor. Deshalb setzen einige Recycler Nasssetzmaschinen zur Trennung von Materialien mit unterschiedlichen Dichten ein. Diese sind jedoch nur eingeschränkt einsetzbar für "neue Baustoffe", einschließlich der Verbundbaustoffe, die mehr und mehr in der Bauindustrie verwendet werden. Einer der Hauptgründe für die zunehmende Komplexität und Heterogenität der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle ist die technische Begrenzung der mechanischen Zerkleinerungs- und Sortiertechniken und der damit verbundene ungenügende Aufschluss der Materialien. Auch die Abtrennung von Verunreinigungen, z.B. Gips und Gipsputze als Hauptsulfatträger wird zukünftig immer mehr an Bedeutung erlangen, da sich die Menge des Gipses im Bauschutt erhöhen wird [1]. Die Heterogenität der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle erschwert eine profitable Wiederverwendung. Daher ist es notwendig, die Heterogenität zu reduzieren. Neben der Optimierung und Entwicklung von Aufschluss- und Sortierverfahren müssen neue Sortierverfahren entwickelt werden.

Sensorbasierte Einzelpartikelsortierverfahren sind derzeit die vielversprechendsten Techniken, um nutzbare Materialfraktionen effizient zu sortieren und Störstoffe und Verunreinigungen aus dem Recyclingmaterial auszutragen. Ziel ist es, sensorgestützte Sortiertechniken in der Baustoffrecyclingindustrie unter Berücksichtigung ökonomischer Faktoren anwenden zu können.

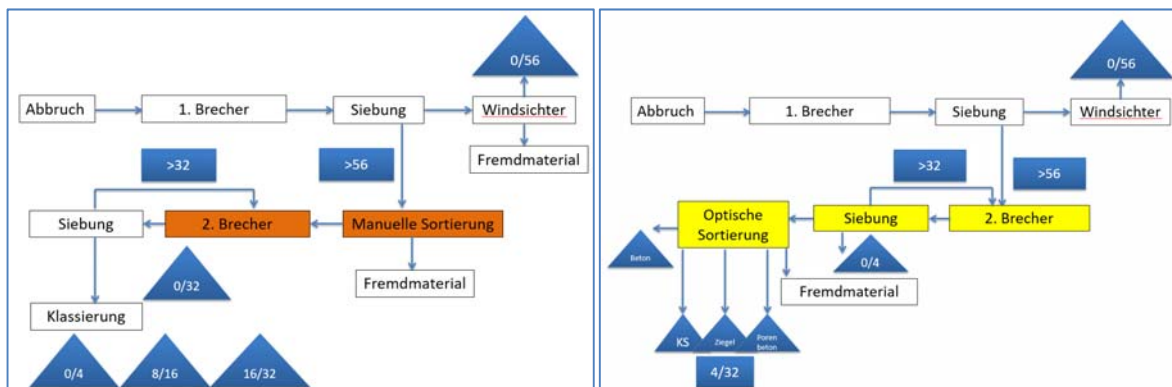
Für die Wiederverwendung der aufbereiteten Gemische als Rohstoff in der Baustoff-Produktion müssen die Bauschuttgemische unbedingt in ungemischte Materialfraktionen getrennt werden. Das Ziel ist, Verunreinigungen aus dem Abfallstrom auszusortieren und

anschließend die Trennung in verschiedene Materialfraktionen. Schwerpunkt ist die Aussortierung von Gips-Anhaftungen und Verbundpartikeln, die durch mechanische Zerkleinerung nicht vermieden werden können. Abbildung 1 zeigt die mittlere stoffliche Zusammensetzung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen aus unterschiedlichen Bauschuttrecyclinganlagen Deutschlands.



**Abbildung 1: Mittlere stoffliche Zusammensetzung und Variationsbereiche für Rezyklat-Proben aus unterschiedlichen Recyclinganlagen in Deutschland in den Jahren 2014-2015 [2], [3]**

In stationären Recyclinganlagen wird die Grobfraction > 56 mm per händischer Sortierung auf rückgewinnbare Materialien, wie z.B. Ziegel sortiert. Auch Störstoffe, wie z.B. Gipskartonplatten werden händisch entfernt. Die Fraktion < 56 mm wird anschließend zerkleinert und mittels Windsichter von Leichtstoffen befreit. Das erzeugte Produkt weist eine definierte Korngrößenverteilung auf. Jedoch wird dadurch ein nicht unerheblicher Teil der Fraktion 0/56 mm nicht sortiert und als Vorsiebmaterial ausgetragen. Die Rückgewinnungsrate für verschiedene Bauschuttbestandteile, wie Ziegel, Kalksandstein usw. ist gering. Zur Implementierung der optischen Sortierstufe in den aktuellen Recyclingprozess einer stationären Aufbereitungsanlage ist es notwendig, über eine Änderung in der Reihenfolge der einzelnen Prozessschritte nachzudenken. Wie in Abbildung 2 dargestellt, könnte die manuelle Sortierung, die sich üblicherweise vor der zweiten Zerkleinerungsstufe befindet, durch eine optische Sortierung nach der zweiten Brechstufe ersetzt werden.



**Abbildung 2: Derzeitiger Aufbereitungsprozess (links) und Vorschlag zur Implementierung der optischen Sortierung in den Aufbereitungsprozess (rechts)**

Für die optische Sortierung ist der Feinanteil 0/4 mm allerdings sehr störend, weshalb dieser vorher abgesiebt werden muss. Zerkleinerung und Sortierung müssten als Prozesse getauscht werden. Im Anschluss an die erste Zerkleinerungsstufe sollte die sensorgestützte Sortierstufe für die Erzeugung von homogenen Materialfraktionen implementiert werden. Diese Vorgehensweise wird allerdings zu einer höheren Heterogenität der Sandfraktion 0/4 mm führen.

## **2. Darstellung des derzeitigen Forschungs- und Wissensstandes in der sensorgestützten Sortierung von Mineralien und mineralischen Bau- und Abbruchabfällen**

Sensorgestützte Sortierverfahren sind in einigen Sektoren der Recyclingwirtschaft (Kunststoff, Glas, Papier) bereits seit vielen Jahren Stand der Technik. Im mineralischen Bereich gibt es bereits unterschiedliche Anwendungen. Die Sortierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen wird weltweit von einigen wenigen Forschergruppen erforscht und hat bisher nur punktuell Eingang in die Praxis gefunden. Im Folgenden wird der aktuelle Forschungsstand zum Einsatz unterschiedlichster Sensoren in der Sortierung von Mineralien und Bauschutt dargestellt. Für die Sortierung im mineralischen Bereich können unterschiedliche Sensoren, die in verschiedenen Wellenlängenbereichen arbeiten, eingesetzt werden:

- Optische Sensoren im infraroten und / oder visuellen Spektrum,
- Röntgenstrahl-Sensoren,
- Laserinduzierte Plasmaspektroskopie.

Im Folgenden und in Tabelle 1 wird eine Übersicht über die wichtigsten Sensortechniken in der Mineralien- und Bauschutt-sortierung gegeben. Alle nachfolgend vorgestellten Sortiersysteme bestehen prinzipiell aus den gleichen sechs Baugruppen: Aufgabevorrichtung, Vereinzelung, Förderband, Beleuchtungseinheit, Sensoreinheit und Sortiereinheit mittels Druckluftimpulsen, die auf das jeweilige Material angepasst werden.

### 2.1 Sortierung von Mineralien

Im Bereich der Mineraliensortierung sind die Firmen *BT-Wolfgang-Binder GmbH* aus Österreich und *Redwave Waste GmbH* aus Wetzlar erfolgreich tätig und setzen die Mineraliensortiermaschinen *MINEXX* und *Redwave Rox* für unterschiedliche Sortieraufgaben ein. Je nach Einsatzgebiet werden auf bis zu 3 m breiten Förderbändern Partikel der Größe 3 bis 300 mm mit Durchsätzen von bis zu 150 t/h sortiert. Zum Einsatz kommen VIS-, NIR-Kameras sowie Kombinationen von VIS- und NIR-Kameras bzw. VIS- und XRF-Kameras (Abkürzungen siehe Legende unter Tabelle 2) bei ein- oder zweiseitiger Betrachtung. Sortiert werden hauptsächlich Industrie-Mineralien, Edelsteine und Erze in unterschiedliche Qualitätsklassen anhand charakteristischer Element-Gehalte [4]. In [5] ist die Aussortierung von Störstoffen (grüne und rote Steine) aus hochwertigen Quarz beschrieben.

Die Firma *LLA Instruments GmbH* aus Berlin setzt die NIR-Spektrometer *KUSTA uniSPEC1.7HSI*, *uniSPEC1.9HSI* und *uniSPEC2.2HSI* beispielsweise für die Sortierung von Dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) und Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ) ein. Beide Mineralien treten i.d.R. in einer Lagerstätte gemeinsam auf. Der für die Zementproduktion benötigte Kalkstein muss einen relativ geringen MgO-Gehalt aufweisen, weshalb der MgO-haltige Dolomit aussortiert wird. Die Sensorik erlaubt sowohl eine zuverlässige Identifizierung des Gesteinstyps als auch eine quantitative Analyse des MgO-Gehaltes mittels der Auswertung der Remissionspektren des Gesteins. Die darüber ermittelten MgO-Gehalte korrelieren sehr gut mit Daten aus der Röntgenfluoreszenzanalyse [6]. Weitere Einsatzgebiete sind die Reinigung von Talk, Borat und Bauxit von Nebengestein sowie die Trennung von Gips und Anhydrit.

Eine weitere Anwendung von NIR-Sensoren ist die Identifizierung von primären quellfähigen Tonen (Smektide) als Störstoff in der Diabas- und Basalt-Steinproduktion [9].

Die *RTT Steinert GmbH* aus Zittau [6] bietet ebenfalls Sortiersysteme im Mineralik-Bereich an. Die *Steinert NIS* (NIR, HSI), *Steinert XSS T* (Röntgentransmission) und *XSS F* (Röntgenfluoreszenz) werden zur Sortierung von Erzen und Kohle angeboten. Das Farbsortiersystem wird unter dem Namen *Steinert KSS 3D* auf dem Markt angeboten. Ein Röntgentransmissions-Sortiersystem (*Steinert XTS*) wird für die Diamantsortierung eingesetzt.

Die Firma *Mogensen GmbH & Co.KG* aus Wedel bietet Sortiermaschinen mit VIS-, NIR- oder Röntgensensorik an. Materialien mit ähnlichen Farben und Massen, lassen sich mit der Röntgentechnik anhand eines weiteren Kriteriums, der Dichte bzw. der Absorption von Röntgenstrahlung unterscheiden (*MSort AQ 1101*). Dadurch können organische Teile, wie Holz und Kunststoff eindeutig von anorganischen Materialien, wie Steinen, Glas oder Keramik unterschieden werden. Die Erweiterung der einfachen Röntgentransmission durch eine zusätzliche spektrale Auflösung (RSA) ermöglicht eine selektive Trennung von Recyclingmaterialien. Als Sortiermerkmal wird die materialspezifische Dichte, unabhängig von Partikelgröße, Teilchenform, Stückgewicht und Oberflächenfarbe bestimmt [10]. Allerdings sind bei der Röntgenstrahlentechnik aufwendige, strenge und kostenintensive Sicherheitsvorkehrungen einzuhalten. Mit der *Mogensen MSort AT1233*® - einem optoelektronischen Sortiersystem - ist es möglich, bisher nicht sortierfähige Materialien von Fremdstoffen zu befreien. Mögliche Einsatzbereiche sind z. B. verschiedene Industriemineralien (Kalkstein, Talkum, Quarz, feuerfeste Materialien) und Steinsalz [11].

Auch die Firma *TOMRA Sorting GmbH* (TITECH) aus Mühlheim-Kärlich bietet Sortiertechnologien mit verschiedenen hochauflösenden Sensoren (VIS, NIR, XRT und XRF) an. Die Sortierung von Industrie-Mineralien, wie Calcit, Dolomit, Feldspat, Magnesit, Quarz, Kalkstein, Steinsalz, Talk und seltenen Erden, Edelsteinen, wie Diamanten, Gold, Erze, wie Eisenerz, Chromerz, Nichtmetallen, wie Kupfer, Wolfram, Nickel, Gold, Silber, Platin, Kohle und Schlacken werden als Anwendungsgebiete angegeben [12].

Die *COMEX AS* Norwegen entwickelte ein Sortiersystem, in dem eine optische Kamera mit einem XRT-Sensor (Röntgentransmission) miteinander gekoppelt oder auch getrennt voneinander betrieben werden kann. Es ermöglicht die Trennung von Gemischen nach Farbe, Form, Textur, Größe, Dichte und auch indirekt nach ihrer Zusammensetzung mit hohen Abscheidegraden zwischen 95-99,9 %. Als Einsatzgebiet für die optische Analyse wird die Quarzsortierung mittels der OSX-Systeme beschrieben, d.h. dunkle und farbige Partikel werden aus dem weißen Quarzmaterial zu 99,9 % abgetrennt. Kalkstein mit einer Ausgangsreinheit von 81,5 % wurde durch die Sortierung auf eine Reinheit von 99,8 % gebracht. Die CXR-Systeme analysieren über Röntgentransmissionsanalyse bei verwachsenen Partikeln, die Anteile an Wert- und Abfallstoff - beispielsweise können Steinkohlepartikel von Störstoffen befreit und Wolframerz-Partikel auf diese Art und Weise auf ihren Wolfram-Gehalt hin geprüft und sortiert werden [13], [14]. Von *Kolacz* [13] wird darauf hingewiesen, dass optische Sortiersysteme mehrstufig bzw. in Kombination mit anderen Trennverfahren betrieben werden sollten, um ein optimales Sortierergebnis zu erreichen.

Die Firma *SECOPTA analytics GmbH* aus Berlin nutzt für die Identifizierung von mineralischen Rohstoffen und Verarbeitungsprodukten, wie z.B. Kohle, Stückerze, Pellets, Bauxit, Sinter, Schlacke, Kies, Kalkstein, Dolomit, Ilmenit, Olivin die Laserinduzierte Plasma Spektroskopie (LIBS, engl.: laser-induced breakdown spectroscopy), um diese anhand ihrer elementaren Zusammensetzung voneinander zu unterscheiden. Durch das Beschießen einer Probe mit kurzen Laserimpulsen ( $10^9 - 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>) kommt es zum Verdampfen eines sehr kleinen Volumens und somit zu einem Plasma mit einer Elektronendichte von  $10^{16} - 10^{19}$  cm<sup>-3</sup> und einer Gastemperatur von  $10^3 - 10^5$  K, welches beim Zerfall Licht emittiert. Dieses Licht ist wiederum charakteristisch für die enthaltenen Elemente, wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel oder auch Phosphor und Halogene und wird mittels eines Spektrometers

erfasst. Aus dem Spektrum wird anschließend die atomare Zusammensetzung ermittelt. Während des Transport der Güter auf Förderbändern wird die Analyse durchgeführt, so dass bei fehlerhaften Materialzuführungen frühzeitig reagiert werden kann. Die Multielement-Analysatoren FiberLIBS und MopaLIBS werden in der industriellen Produktion zur Analyse und Klassifizierung von Materialströmen eingesetzt [15].

## 2.2 Sortierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen

Die Erkennung und Sortierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen durch sensorgestützte Sortierung ist eine ziemlich junge Applikationslinie, die derzeit nur von einigen wenigen Forschergruppen weltweit bearbeitet wird. Als wichtigste Forschungsgruppen hierfür sind:

- die *Sapienza University of Rome* (SUR),
- die Firma *LLA Instruments GmbH* in Zusammenarbeit mit der Bauhaus-Universität Weimar (LLA/BUW)
- die *Bauhaus-Universität Weimar* in Zusammenarbeit mit der Firma *LLA Instruments GmbH*, dem *IAB Weimar*, der *sesotec GmbH* und der *T.B.R. Teltower Baustoffrecycling GmbH Berlin* (BUW/LLA/IAB),
- die *Bauhaus-Universität Weimar* in Zusammenarbeit mit der *Technischen Universität Ilmenau* (BUW/TUI)
- die *University of Sao Paulo* (USP)
- die Firma *RTT Steinert GmbH* in Zusammenarbeit mit der *GAIKER-IK4-Organisation Parque Tecnológico Zamudio* (Spanien) (RTT) und
- vier verschiedene industrielle Forschungscoalitionen, im Rahmen von EU oder national geförderten Projekten IRCOW, HISER, CDW Recycling, C2CA

zu nennen.

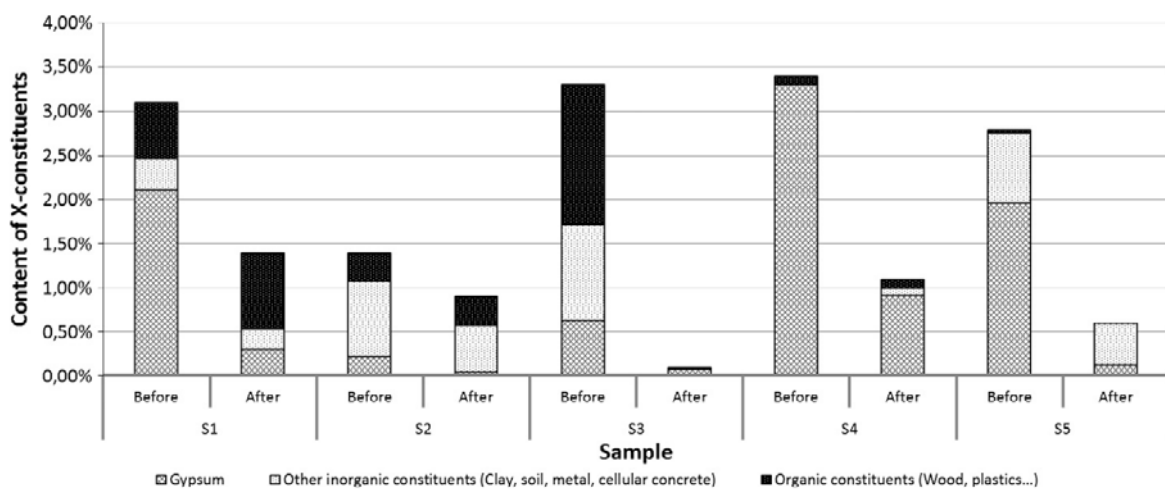
An dieser Stelle soll kurz auf die Unterschiede in den verwendeten Wellenlängenbereichen, Sensoren, Auswertalgorithmen und wichtigsten Ergebnisse der einzelnen Forschergruppen eingegangen werden.

Alle von der SUR-Gruppe durchgeführten Forschungen wurde im Rahmen des EU-Projekts „C2CA“ durchgeführt [16]. Die Forschung der SUR-Gruppe konzentriert sich hauptsächlich auf Hyper-Spectral-Imaging (HSI) - gestützte Aussortierung von Stör- und Schadstoffen aus rezyklierten Gesteinskörnungen im Labormaßstab. Partikel aus Holz, Kunststoff, Schaum, Gips und Ziegel werden mittels einer NIR-Kamera mit einem Imaging-Spektrographen *ImSpector N17E™* (Wellenlängenbereich von 1,0 bis 1,7 µm, spektrale Auflösung 7 nm, 240 × 320 Pixel) aufgenommen. Als Auswertalgorithmen kamen die Principal Components analysis (PCA) und die Partial Least-Square Discriminant Analysis (PLS-DA) zum Einsatz. Die angelerten und getesteten Partikel waren bezüglich der Anzahl und der Varietät begrenzt. Zusammenfassend wird für alle o.g. Materialien eine gute Erkennung der Störstoffe mit einzelnen Fehlinterpretationen angegeben [17]. In [18] werden ähnliche Untersuchung erläutert, bei denen jedoch der SWIR-Bereich (kurzwelliges Infrarot, engl.: short wavelength, Wellenlängenbereich 1,0 – 2,5 µm) in die Untersuchungen mit einbezogen wurde. Verwendet wurde ein *ImSpector N25E™*. Weitere Schlussfolgerungen bezüglich der Qualität der Aussortierung von Schadstoffe durch den erweiterten Spektralbereich in den SWIR-Bereich hinein, wurden nicht veröffentlicht.

In verschiedenen Projekten (IRCOW [19], HISER [20], CDW-Recycling [21]) mit europäisch zusammengesetzten Forschungspartnern (Firmen und Forschungseinrichtungen) wurden ebenfalls Untersuchungen zur sensorgestützten Sortierung von Bauschutt durchgeführt. Jedoch sind dazu nur bedingt veröffentlichte Ergebnisse zu finden.

Im Rahmen des IRCOW-Projektes wurden von *Vegas u.a.* Ergebnisse zur NIR-Sortierung von verschiedenen Bauschutt-Gemischen vorgestellt [22]. Die NIR-Sortiertechnik für die Versuche wurde von der Firma *TOMRA Sorting GmbH* aus Mühlheim-Kärlich zur Verfügung gestellt.

Zielstellung war es, aus fünf Gemischen rezyklierter Gesteinskörnungen aus verschiedenen Ländern (Deutschland, Schweden, Spanien, Italien) alle Gipsbestandteile, Organik und Porenbeton-Partikel abzutrennen, so dass ein höherwertiges Gemisch erzeugt wird. Die meisten der Gemische enthielten nach der NIR-Sortierung weniger als 1 M.-% an Fremdbestandteilen (Abbildung 3). Besonders effektiv war die Aussortierung von Gipsbestandteilen, welche im Mittel um ca. 83 % reduziert werden konnten. Die Anteile an anderen anorganischen und organischen Bestandteilen nahm ebenfalls um durchschnittlich 22 % bzw. 13 % ab. Das schwedische und spanische Gemisch (S2 und S4, siehe Abbildung 3) enthielt anstatt des üblichen weißen Porenbetons einen dunkelblauen Porenbeton, welcher nicht erkannt wurde und wie im Folgenden gezeigt, zu erhöhten säurelöslichen Sulfatgehalten führt. Vor und nach der Sortierung wurden der Gehalt an Metallen und das Eluat analysiert sowie eine Bestimmung des Feststoff-Sulfatgehaltes und der säurelöslichen Sulfate (Tabelle 1) durchgeführt. Der Sulfatgehalt liegt nach der Sortierung bei fast allen Gemischen unterhalb der gegebenen Grenzwerte von 0,8 % oder 1 % für den gesamten Sulfatgehalt bzw. 0,8 % für die säurelöslichen Sulfate.



**Abbildung 3: Vergleich der Anteile an Verunreinigungen in den fünf untersuchten rezyklierten Baustoffgemischen vor und nach der NIR-Sortierung [22]**

**Tabelle 1: Gesamtsulfatgehalt und Gehalt an säurelöslichem Sulfat der Rezyklate vor und nach der NIR-Sortierung [22]**

		S1		S2		S3		S4		S5	
		Before NIR sorting	After NIR sorting	Before NIR sorting	After NIR sorting	Before NIR sorting	After NIR sorting	Before NIR sorting	After NIR sorting	Before NIR sorting	After NIR sorting
Total sulphur content	(%S)	1.59	0.21	0.22	0.20	0.55	0.29	1.38	0.97	1.44	0.21
Acid soluble sulphates	(%SO <sub>3</sub> )	3.80	0.51	0.50	0.42	1.11	0.47	3.25	2.37	3.41	0.32

Die Kosten für die NIR-Sortierung der Bauschutt-Gemische werden mit 0,80 und 1,50 €/t bei einem Durchsatz von 11 t/h angegeben.

Die Firma *LLA Instruments GmbH* hat in Zusammenarbeit mit der *Bauhaus-Universität Weimar* (LLA/BUW) grundlegende Untersuchungen zur Unterscheidbarkeit einer Vielzahl an Bauschutt-Bestandteilen im NIR-Spektrum erarbeitet und für die Sortierung von Bauschutt nutzbar gemacht. LLA bietet innerhalb der Module *idDebris* und *idCM* die beiden Spektrometer *KUSTA2.2MPL-24V* und *KUSTA2.2MSI* für die Abtrennung bzw. Identifikation von Fremdstoffen, wie Kunststoffe, Holz/Papier, Gips und optional Porenbeton, Kalksandstein, Beton und Ziegel an [23].

Das optische Sortiersystem *Mogensen MSort AT1233*® ist in der Lage, farblich gut zu unterscheidende Bauschuttkomponenten (Bsp. Ziegelsplitt / Beton) zu erkennen [11].

In einer Zusammenarbeit zwischen der *Bauhaus-Universität Weimar* und der *Technischen Universität Ilmenau* ([17] und [25]-[30]) (BUW/TUI) wurden Untersuchungen durchgeführt, welche sich mit der optischen Differenzierung von phänotypisch ähnlichen Materialien wie z.B. Beton, Porenbeton, Leichtbeton und auch porösen und dichten Ziegeln beschäftigen. Zunächst erfolgten Untersuchungen im VIS-Spektralbereich. Aus Farbe und Textur wurden im Labormaßstab Unterscheidungsmerkmale herausgearbeitet, indem Algorithmen des maschinellen Lernens zum Einsatz kamen. Das Kernergebnis war die Bestimmung von geeigneten Klassifikatoren (hier Support Vector Machines und Random forrest) für die betrachteten Baumaterialien. In [31] wird der VIS-Wellenlängenbereich erweitert um Informationen aus dem IR-Spektrum.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt der *Bauhaus-Universität Weimar* mit der *LLA Instruments GmbH*, dem *IAB Weimar*, der *sesotec GmbH* und der *T.B.R. Teltower Baustoffrecycling GmbH Berlin* wurde ein Prototyp einer NIR-Sortiermaschine für mineralische Bau- und Abbruchabfälle entwickelt und getestet (BUW/LLA/IAB) [4], [22], [34]. Im Prototyp wird als hyperspektrale Kamera eine *KUSTA 2.2 MSI (LLA Instruments GmbH)*, die im Wellenlängenbereich von 1,2 bis 2,2  $\mu\text{m}$  arbeitet, eingesetzt. Das Spektrometer ermöglicht eine Auflösung von  $< 8$  nm und arbeitet mit einer Messfrequenz von 270 Hz.

Zusammenfassend wurde im visuellen, wie auch im nahinfrarotem Spektrum eine sehr gute Unterscheidbarkeit der wichtigsten Bauschutt-Bestandteile ermittelt. Beton und Ziegel sowie Porenbeton und Kalksandsteine sind in beiden Spektren sehr gut zu unterscheiden. Leicht- und Normalbetone sind im nahen Infrarotspektrum nicht unterscheidbar, dafür aber im visuellen Spektrum. Gips als Störstoff ist in beiden Spektren sehr gut detektierbar. Verschiedene Ziegelarten sind im nahinfraroten Spektrum nur schwierig auseinander zu halten. Hier gibt es dafür im visuellen Spektrum gute Möglichkeiten der Unterscheidung.

Die wichtigsten Ergebnisse dazu werden in Kapitel 3 und 4 genauer ausgeführt.

Die Firma *RTT Steinert GmbH, Zwickau* hat gemeinsam mit spanischen Forschern Untersuchungen zur Sortierung der "grauen Bauschuttfraktion" (Betone, Natursteine ...) und der "roten Bauschuttfraktion" (Ziegel, Fliesen ...) durchgeführt. Untersuchungsmaterialien waren Beton / Mörtel-Aggregate ("grau"), Natursteine ("grau"), Ziegel / Dachziegel ("rot"), Wand- / Bodenfliesen - glasiert und unglasiert ("rot") und andere Keramik ("rot"). Insgesamt wurden 163 Proben aus vier EU-Ländern (Spanien, Frankreich, Belgien und Niederlande) betrachtet. Die Untersuchungen wurden in zwei Stufen durchgeführt. In der ersten Stufe wurden stationäre Remissionsmessungen im Bereich von 1,4 - 1,9  $\mu\text{m}$  mittels eines NIR-SWIR-Laborspektrometers *KUSTA 4004P (LLA Instruments GmbH)* durchgeführt und im Labormaßstab allgemeine Merkmale der Spektren der Probenmaterialien untersucht. In der zweiten Stufe kamen zwei verschiedene hyperspektrale Kameras vom Typ *RED-EYE 1.7* und *2.2 (inno-spec GmbH, Deutschland)* im industriellen Maßstab zur Anwendung. Untersucht wurden verschiedene Wellenlängenbereiche (1,4 ... 1,9  $\mu\text{m}$ , 1,4 ... 1,7  $\mu\text{m}$  und 1,7 ... 1,9  $\mu\text{m}$ ), um herauszufinden, welcher Bereich für die Bauschuttidentifizierung am besten geeignet ist. Für die Auswertung der Spektren wurde die PLS-DA [39] auf die 1. Ableitungsspektren angewendet. Es konnte gezeigt werden, dass die spektralen Unterschiede zwischen der "grauen" und "roten" Fraktion ausreichend sind für eine automatisierte Sortierung. Dafür sollte der komplette Spektralbereich zwischen 1,2 – 2,2  $\mu\text{m}$  genutzt werden. Vor allem die Bereiche links und rechts von der Wasserbande bei 1,9  $\mu\text{m}$  sollten miteinbezogen werden. Aussagen zum Einfluss der Materialfeuchte auf das Sortierergebnis wurden nicht gemacht. Es ist geplant, in weiteren Untersuchungen die Unterklassen zu verfeinern [35].

Die brasilianische Forschungsgruppe um *Angulo (USP)* untersuchte die Identifizierung und Aussortierung von roten Keramiken aus unterschiedlichen Bauschuttgemischen (A, B, C, siehe Abbildung 4) mit dem Ziel, ein für die Herstellung von Recycling-Beton geeignetes Rezyklat zu erzeugen. Ausgewertet wurden Sortierversuche bei *CommoDaS/Titech* in Wedel sowie auch

eigene mit einer CCD-Kamera (Axiocam HR Zeiss) und entsprechender Beleuchtung aufgenommene Farbbilder, welche mit Image-Pro Plus 4.0 hinsichtlich der RGB-Farbtintensitäten analysiert wurden. Im Ergebnis zeigt sich eine gute Erkennbarkeit der roten und weißen Keramiken anhand der Farbtintensitäten im Rot- und Grünkanal. Jedoch können anhand der reinen Farbanalyse keine porösen zementgebundenen Partikel erkannt werden, die aber zu großen Anteilen (70 – 90 %) auch eine geringe Rohdichte und damit erhöhte Wasseraufnahme aufweisen. Die Farbsortierung reduzierte den Anteil an roter Keramik von ca. 90 % im Input auf 2-22 % im Produkt (Abbildung 4) [36]. Abbildung 5 zeigt die Abnahme der Betondruckfestigkeit mit steigendem Anteil an roter Keramik [36].

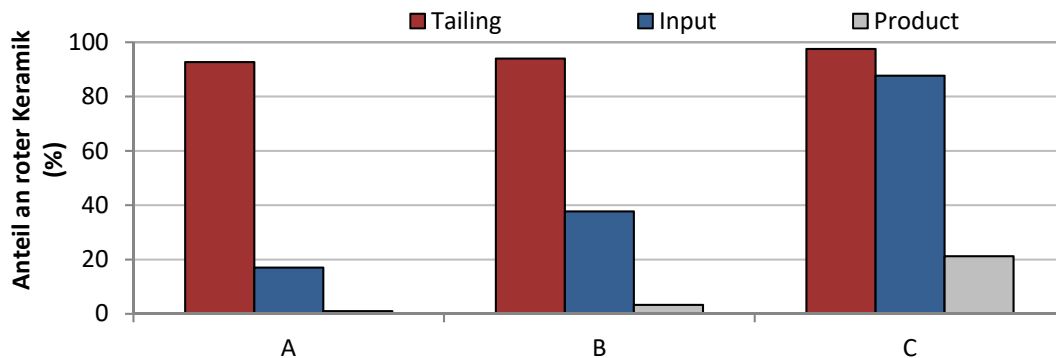


Abbildung 4: Gehalt an roter Keramik im Input und Output nach der optischen Sortierung [36]

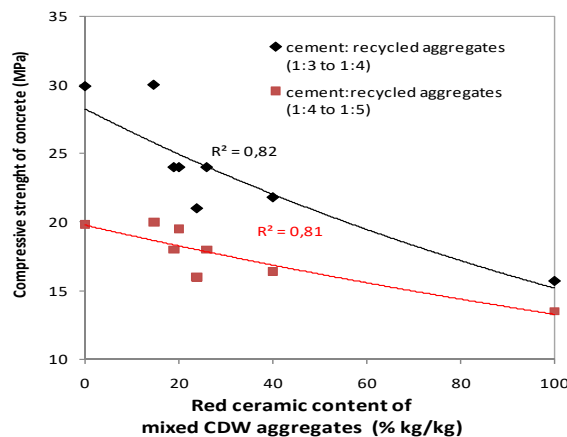


Abbildung 5: Einfluss des Gehaltes an roter Keramik in rezyklierten Gesteinskörnungen auf die Druckfestigkeit des Betons [36]

Die Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) - Technologie kann ebenfalls zur Erkennung der elementaren Zusammensetzung im Vorfeld des Aufbereitungsprozesses eingesetzt werden. In einer Zusammenarbeit der TU Delft und der Secopta analytics GmbH wurde untersucht, ob mittels LIBS eine Qualitätsverbesserung von aufbereitetem Altbeton (2-32 mm) möglich ist. Hierfür wurden Voruntersuchungen an Kies-, grünen Glas- und Plastikpartikel im Größenbereich 2-8 mm hinsichtlich ihrer elementaren Zusammensetzung durchgeführt [37]. Untersucht wurden die Einstellparameter Oberflächenfeuchtigkeit, offene Luft, Brennweite, Laserenergie und Winkel des Lasers mit dem Ziel der bestmöglichen Spektrenqualität. Hierfür wurde eine Optimierung vorgenommen. Für sehr staubige oder feuchte Partikel bzw. Partikel mit einer dicken Oxidschicht ergaben sich anormale Spektren. Abhilfe schafft der Einsatz zweier Laser oder eines Lasers mit höherer Schussrate, was jedoch die Kosten für die Analytik erhöht.



**Tabelle 2: Übersicht über die wichtigsten Sensortechniken für die Mineralien- und Bauschutterkennung**

Sensorprinzip		Wellenlängenbereich	Separation von	Vorteile	Nachteile	Quellen
Optische Sensoren	VIS	390 - 750 nm	Bauschutt, Edelsteine (z.B. Topas, Aquamarin, Diamant), Mineralien (z.B. Quarz, Kalkstein, Kalzit, Dolomit, Talk, Feldspat, Bauxit, Magnesit, Kreide), Verbrennungsschlacken, Glas	Erzeugung sortenreiner Fraktionen, Aussortierung von Störstoffen, Detektion von transparenten und schwarzen Partikeln	Mineralogische Unterschiede können nicht detektiert werden	Binder [4], Redwave [4], BUW/TUI [25], [26], [27], Mogensen [11], Tomra [12], USP [36], SUR [18], RTT [7], [8]
	NIR	750 - 1,4 µm	Bauschutt, Dolomit, Industriemineralien	Erkennung der mineralogischen Zusammensetzung, Erzeugung sortenreiner Fraktionen, Aussortierung von Störstoffen	Schwarze und transparente Materialien sind schwer erkennbar. Farb- und Texturunterschiede können nicht detektiert werden.	LLA [23], Redwave [4], BUW/TUI [24], [30], [31], LLA/IAB/BUW [34] Tomra [12], SUR [17], RTT [7], [8] LLA [23], SUR [18], RTT [35]; BUW/LLA/IAB [34] BUW/TUI [31]
	SWIR	1,4 µm - 3 µm	Bauschutt			
	IR	780 nm - 1 mm	Bauschutt			
Röntgenstrahlensensoren	XRT	1 nm - 5 nm	Beton und Mörtel, Baumischabfälle, Glassortierung (Bleiglas und Glaskeramik)	hochqualitatives Recycling des mineralischen Bauschutts	Vorsehung einer Abschirmung	Mogensen [10], [11], RTT [7], [8]
	XRF/XRT		Erze, Mineralien	Erkennung chemischer Komponenten		Binder [4], Redwave [4]
	XRT		Kohlepartikel, Wolframerz	ergänzend zu anderen Sensoren eingesetzt		COMEX [13], [14]
	XRT		Kalkstein, Kohle, Gold, Diamanten, Erze			TOMRA [12]
Laserein-duzierte Plasmaspektroskopie	LIBS		Kohle, Stückerze, Pellets, Bauxit, Sinter, Schlacke, Kies, Kalkstein, Dolomit, Ilmenit, Olivin	Bestimmung der atomaren / elementaren Zusammensetzung	Aufwändige Kalibrierung	Secopta [15]
			Altbetonrezyklate			TU Delft [37], [38]

Legende: VIS-Visuell, NIR-Nahinfrarot, SWIR- kurzwelliges Infrarot, IR-Infrarot, XRT- Röntgentransmission, XRF- Röntgenfluoreszenz, LIBS-Laserinduzierte Plasmaspektroskopie

Weiterführende Untersuchungen beziehen sich auf die Aussortierung von sehr zementsteinhaltigen Altbetonrezyklaten aus dem Rezyklat, um hochwertige rezyklierte Gesteinskörnungen für die Herstellung von Recyclingbeton zu erhalten bzw. um die zementsteinhaltigen Partikel einer Mahlung zuzuführen zur Erzeugung / Reaktivierung eines Betonmehls als Kompositmaterial in der Zementherstellung [38].

Eine weitere Möglichkeit der Unterscheidbarkeit von Baustoffen erläutern *Clark* und *Tatzer*: Die Infrarot-Thermographie misst die Infrarot-Strahlung eines Objektes entsprechend der Stefan-Boltzmann-Gleichung [39]. Die Abstrahlung ist von zwei Variablen abhängig – der Temperatur des Objektes und dem Emissionsvermögen des Objektes. Alle Baumaterialien besitzen ein hohes Emissionsvermögen und erlauben deshalb die direkte Messung der Objekttemperatur. Die Feuchtigkeit verbunden mit der Porosität ist ein Schlüsselparame-ter für die Qualitätsverbesserung von rezyklierten Gesteinskörnungen und korreliert mit der Objekttemperatur [40]. Eine technische Anwendung dieser Methode ist derzeit nicht bekannt.

### 3. Eigene Untersuchungen zur Entwicklung einer sensorgestützten Sortierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen

#### 3.1 Probenmaterial

Wie schon oben erwähnt, wurden in verschiedenen Forschungsarbeiten Grundlagenuntersuchungen zur Anwendbarkeit der VIS- und NIR-Sensortechnik für die Sortierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen an der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Dabei wurde nahezu auf die gleichen Probenmaterialien zurückgegriffen. Von den folgenden Materialklassen wurden je zehn Unterklassen (darin enthalten jeweils ungebrauchte und rezyklierte Baustoffe) in der Größe 8/16 mm zusammengestellt und hinsichtlich der baustofftechnischen, mineralogischen und spektraltechnischen (VIS und NIR) Parameter untersucht:

- Beton
- Leichtbeton
- Porenbeton
- Ziegel
- Kalksandstein
- Gips
- Organisches Material.

Der Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Wasseraufnahme ist für alle untersuchten Proben außer Gips und Organik in Abbildung 6 dargestellt.

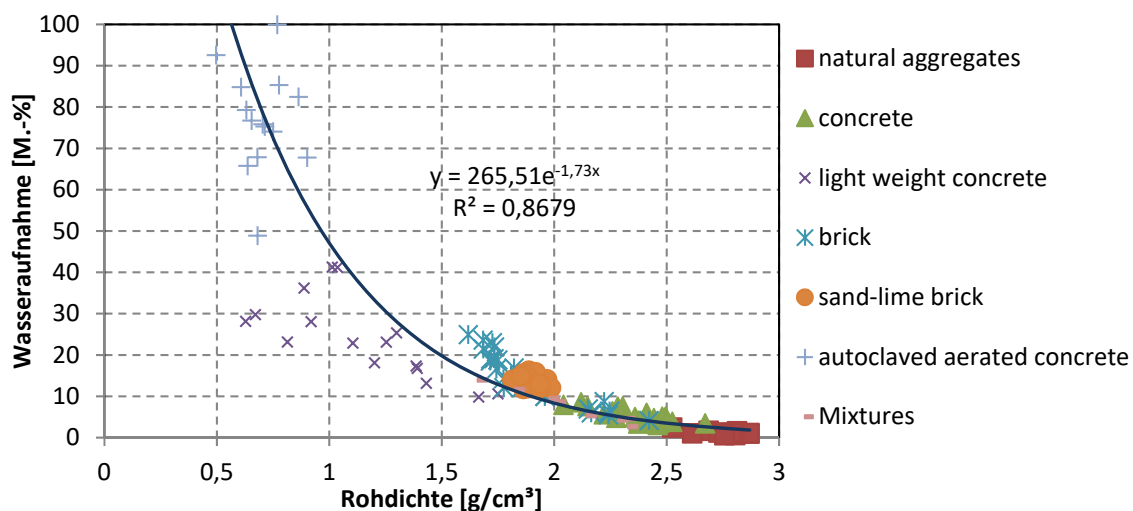


Abbildung 6: Übersicht über die Rohdichten und Wasseraufnahmen aller analysierten Proben (Korngröße 8/16 mm)

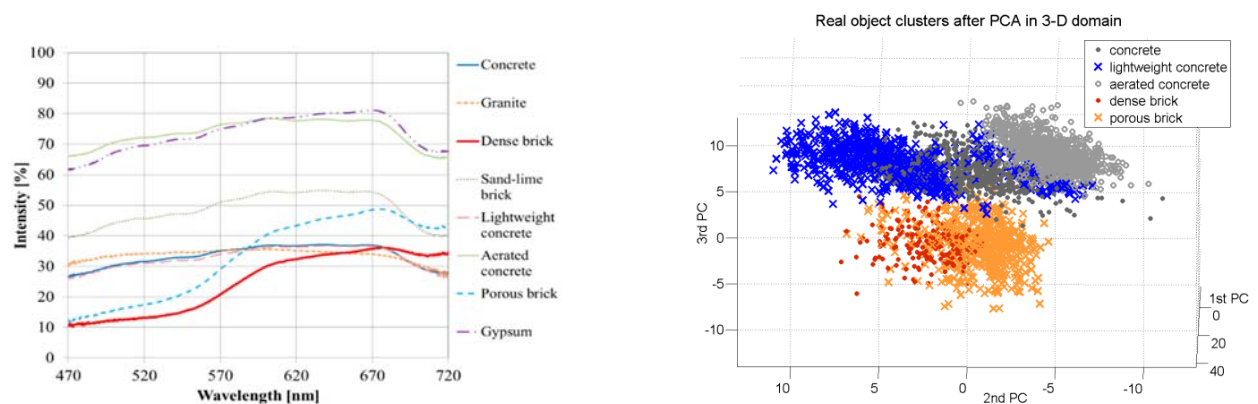
### 3.2 Untersuchungen im VIS-Spektrum

Die ersten Untersuchungen gemeinsam mit der TU Ilmenau [27], [31] befassten sich mit der optischen Unterscheidbarkeit der o.g. Materialklassen mit Fokus auf phänotypisch ähnlichen Baustoffen, wie Beton, Leichtbeton und porosierter und dicht gebrannter Ziegel. Dafür wurden Aufnahmen mit einer Farbbildkamera (RGB-Matrix-Kamera Ocean Optics USB2000+, Wellenlängenbereich 200 bis 1100 nm) der Proben mit einem speziell dafür angepassten Versuchsaufbau, bestehend aus einer Aufgabevorrichtung, Vereinzelung, Förderband, Belichtungs- und einer Bildaufnahmeinheit, aufgenommen (Abbildung 7, links). Der Lerndatensatz umfasst ca. 32000 Objekte. Aus diesen Aufnahmen wurde ein Maximum an Informationen hinsichtlich der Farbe, der Form, der Größe und der Textur ermittelt. Aufgabenstellung war es, herauszufinden, welche der Parameter bzw. deren Kombination relevant für die Erkennungsaufgabe sind. Hierfür wurden verschiedene Klassifikatoren des überwachten maschinellen Lernens auf verschiedene Merkmalsvektoren als numerische Darstellung von Objekten des gegebenen Datensatzes getestet. Von jeder Materialklasse wurden ca. 1000 Bilder, d.h. mehr als 100 Teilchen pro Probe aufgenommen, um einen guten statistischen Vergleich zu realisieren.

Nach der Segmentierung und Umwandlung vom RGB- in den HSI-Farbraum wurde für jedes Objekt ein Merkmalsvektor mit insgesamt 234 Merkmalen berechnet. In diesem sind Farb- und Texturmerkmale enthalten, wie beispielsweise der Mittelwert pro Kanal und Merkmale berechnet aus der Grauwert-Matrix, wie Energie, Homogenität und Kontrast für jeden HSI-Kanal. Zusätzlich werden größen- und rotationsinvariante Formmerkmale, wie beispielsweise modifizierte Fourier-Deskriptoren berechnet. Die verwendeten Merkmals-Algorithmen sind Teil der Software *Halcon* [28]. Wie schon aus früheren Untersuchungen bekannt, zeigte sich auch hier, dass die besten Unterscheidungsmerkmale Farb- und insbesondere Texturmerkmale sind. Kontur- bzw. Formmerkmale sind nicht so gut geeignet. Sehr gut geeignete Texturmerkmale konnten aus dem H- und S-Kanal des HSI-Farbraum gewonnen werden.

Die ersten Untersuchungen im VIS-Spektralbereich haben gezeigt, dass einige Materialien signifikante Unterschiede im Spektrum zeigen, wie beispielsweise die Ziegelvarietäten. Andere Materialien zeigen nur Unterschiede in der Intensität wie Beton, Gips und Porenbeton. Klassen mit ähnlicher mineralogischer Zusammensetzung, wie z. B. Leichtbeton und Beton, zeigten sehr ähnliche spektrale Eigenschaften ohne signifikante Unterschiede in der Intensität (Abbildung 7, links). Dies zeigt die Notwendigkeit für zusätzliche Informationen aus anderen spektralen Bereichen.

Abbildung 7, rechts zeigt die Darstellung der ersten drei Hauptkomponenten nach der Hauptkomponentenanalyse (PCA). Starke Unterschiede zwischen Ziegel und Beton sind gut sichtbar am Abstand zwischen den Clustern. Aber auch die verschiedenen Beton- und Ziegelarten sind untereinander gut voneinander getrennt. Die Darstellung der nur ersten drei Hauptkomponenten ist immer mit einem Verlust von Informationen verbunden.



**Abbildung 7: Mittlere VIS-Spektren der untersuchten Materialklassen (links) und Darstellung der Cluster nach der PCA (rechts)**

Aus einer Vielzahl an möglichen Klassifikatoren der Machine-Learning Bibliothek *Weka* [29] wurden folgende ausgewählt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Merkmalsextraktion getestet:

LibSVM als C-SVM und nu-SVM, Entscheidungsbaum-Klassifikatoren, wie J48 und Random Forest, abstands-basierte Klassifikatoren, wie k-nearest neighbour und statistische Klassifikatoren, wie Naive Bayes Klassifikator unter Verwendung einer 10-fach Kreuzvalidierung. Die Support-Vector-Maschine (SVM) gilt derzeit als einer der leistungsfähigsten Klassifizierer. Die SVM führt eine nichtlineare Projektion von Daten in einem höherdimensionalen Merkmalsraum aus, so dass diese linear getrennt werden können. Eine einfache Möglichkeit, die Leistung des Klassifikators zu bewerten, ist die Erkennungsrate in Prozent als Quotient aus der Anzahl der richtig erkannten Objekte und der Anzahl aller Objekte multipliziert mit 100 zu berechnen.

Zum Beispiel wird die Erkennungsrate des Ziegels nach folgender Gleichung berechnet:

$$r_{indiv} = \frac{\text{Anzahl der korrekterkannten Ziegelobjekte}}{\text{Anzahl aller Ziegelobjekte}} \cdot 100\% \tag{1}$$

Die gesamte Erkennungsrate wird wie folgt berechnet:

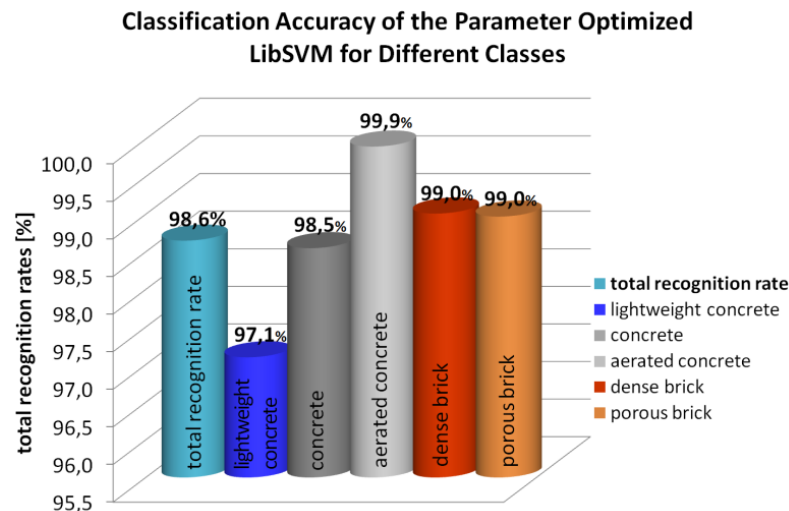
$$r_{Total} = \frac{\text{Anzahl der korrekt erkannten Objekte}}{\text{Gesamtanzahl aller Objekte}} \cdot 100\% \tag{2}$$

Die Untersuchungen zeigten, dass der Random Forest, der Nu- und C-LibSVM mit Gesamt-Erkennungsraten von 94,7 – 97,2 % die besten Ergebnisse lieferten. Der statistische Klassifikator Naive Bayes reached brachte mit 44,8 % die geringste Gesamt-Erkennungsrate (Tabelle 3). Die klassenweisen Erkennungsraten, die mit LibSVM erreicht wurden, sind in Abbildung 8 gezeigt.

**Tabelle 3: Erkennungsraten der untersuchten Klassifikatoren**

Classes	Classifiers											
	NNeighbor		C-SVM		Nu-SVM		Naive Bayes		RandomForest		J48 Tree	
	IRR (%)	TRR (%)	IRR (%)	TRR (%)	IRR (%)	TRR (%)	IRR (%)	TRR (%)	IRR (%)	TRR (%)	IRR (%)	TRR (%)
concrete and aggregates	78.5		95.4		97.2		79.7		91.1		81.4	
clinker and dense brick	76.5		99.0		94.3		97.4		95.5		91.1	
sand-lime brick	82.0	84.8	97.8	97.2	96.4	95.8	71.3	44.8	93.7	94.7	84.3	88.0
other mineral components	89.5		97.6		95.9		12.2		96.6		92.3	
foreign components	82.4		95.7		98.1		77.2		92.0		81.5	

IRR= Individual recognition rate; TRR=Total recognition rate



**Abbildung 8: Leistung des Klassifikators LibSVM unter Verwendung der 56 am besten geeigneten Merkmale**

Für alle Klassen wurden sehr gute Einzelerkennungsraten  $> 97\%$  erreicht. Die höchste Erkennungsrate wurde mit  $99,9\%$  für die Klasse Porenbeton erreicht. Ähnlich gute Erkennungsraten wurden mit  $97,1\%$  bis  $99,0\%$  für die anderen vier Klassen erreicht. Diese Leistung scheint sehr hoch zu sein, wobei jedoch die Komplexität der Erkennungsaufgabe im Auge behalten werden muss. Bisher bezogen sich die Untersuchungen auf nur fünf Materialklassen. Wenn mehrere Klassen in die Untersuchungen einbezogen werden, wird die Erkennungsrate vermutlich um ca. 10 oder 15 Prozent sinken.

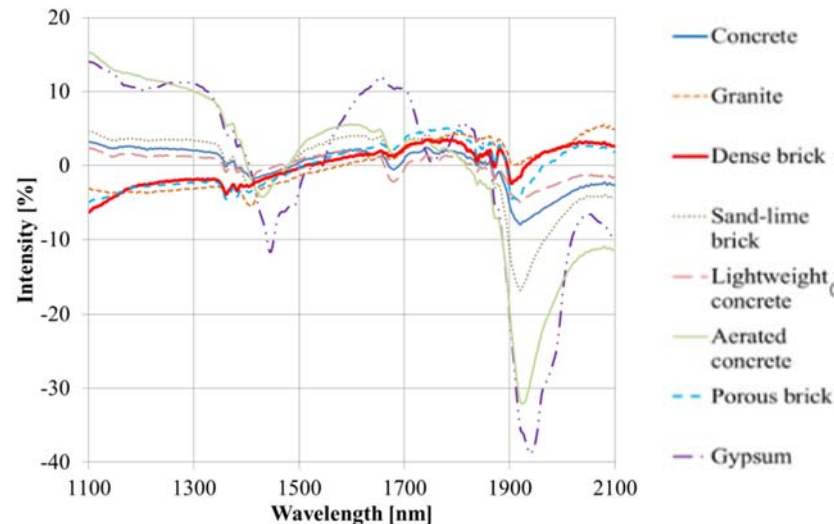
Es hat sich gezeigt, dass sich auf Basis der Farbbilder gute Erkennungsraten erreichen lassen. Es gibt jedoch einige Falschzuordnungen, hauptsächlich bei einigen für das Recycling kritischen Klassen. Hier ist eine Ergänzung der Informationen aus dem visuellen Spektrum mit Informationen aus dem IR- bzw. NIR-Spektrum als sinnvoll anzusehen.

### 3.3 Untersuchungen im IR- und NIR-Spektrum

Ziel war es, geeignete Unterscheidungsmerkmale für die Identifizierung von Bauschuttmaterialien zu finden. Dazu wurden in einem ersten Schritt an der TU Ilmenau für die o.g. Proben Spektren im IR-Bereich aufgenommen und analysiert. Im zweiten Schritt erfolgte in Zusammenarbeit mit der LLA Instruments GmbH die Betrachtung und chemometrische Auswertung der NIR-Spektren der gleichen Materialklassen. Die Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen aus der Spektralanalyse und die mineralogische Zusammensetzung wurden analysiert.

#### 3.3.1 IR-Spektrum

Für die Untersuchungen im IR-Spektrum wurde ein Polytec-Spektrometer PSS 21210 mit einem InGaAs Detektor im Bereich von 1100 bis 2100 nm eingesetzt. Untersucht wurden nur ungebrauchte Baustoffe (Abbildung 9).



**Abbildung 9: Zentrierte IR –Spektren der untersuchten Materialklassen [41]**

Bei Anwendung der ausgewählten zehn am besten geeigneten Hauptkomponenten wird die Klassifikation ohne einen Informationsverlust beschleunigt.

Es wurde eine Gesamt-Erkennungsrate von 98,4 % erreicht bei 10-fach Kreuzvalidierung. Die einzelnen Erkennungsraten betragen 100 % für Asphalt, 97,4% für Beton, 98,3% für Gips, 100 % für Granit, 98,5 % für Kalksandstein, 97,5 % für Leichtbeton, 99,1% für Porenbeton, 100 % für dichte Ziegel und 98,1% für poröse Ziegel. Falschzuordnungen traten in den Klassen Leichtbeton und Beton sowie zwischen den Klassen dichten und porösen Ziegel auf.

### 3.3.2 NIR-Spektrum

Innerhalb verschiedener Forschungsprojekte der BUW/LLA/IAB-Gruppe wurden Grundlagen zur Unterscheidbarkeit der Baustoffe im nahen Infrarot-Spektrum erarbeitet sowie ein Prototyp für die Sortierung von Bauschutt entwickelt.

Die Grundlagenuntersuchungen wurden an einem Laborspektrometer uniSpec2.2S, LLA Instruments GmbH durchgeführt, welches aus Förderband, Beleuchtung und Kamerasystem besteht (Abbildung 10, links). Die Informationen aus den Spektren wurden mittels chemometrischer Methoden und der Partial Least Squares (PLS)-Datenanalyse ausgewertet. Die in Baustoffen vorkommenden Mineralien werden hauptsächlich den Mineralklassen Karbonate, Silikate (einschließlich Schichtsilikate), Sulfate (insbesondere Gipsprodukten) und Oxide (beispielsweise Hämatit) zugeordnet. Für einen Teil der Proben wurde eine qualitative mineralische Phasenanalyse mittels des Röntgendiffraktometers Diffrac Plus-EVA von der Firma Bruker AXS durchgeführt.

Beton und Leichtbeton sind im nahen Infrarot hauptsächlich über den Calcit-Peak im Spektrum nachgewiesen. Die in Leichtbeton eingesetzten Gesteinskörnungen, wie Blähglas oder Blähton zeigen keine signifikanten Banden im NIR, weshalb nicht zwischen normalen und Leichtbeton zu unterschieden werden kann. Porenbeton kann genauso wie der Kalksandstein anhand der vorhandenen Tobermorit-Phase identifiziert werden. Die untersuchten Ziegel sind in ihrer Zusammensetzung sehr unterschiedlich je nach Ausgangsmaterial. Die Ziegel weisen ein charakteristisches NIR-Spektrum auf, aber es ist nicht möglich zwischen Ziegeln höhere und geringere Dichte zu unterscheiden. Die Banden für Gips und Bassanit (Halbhydrat) sind sehr deutlich im Spektrum zu erkennen und können sehr gut für die Detektion verwendet werden.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Materialkombinationen Beton / Ziegel, Porenbeton / Kalksandstein und Gips / restliche Materialien können im NIR sehr gut voneinander unterschieden werden.
- Nicht gut unterschieden werden können Normalbeton und Leichtbeton sowie unterschiedliche Ziegelvarietäten.

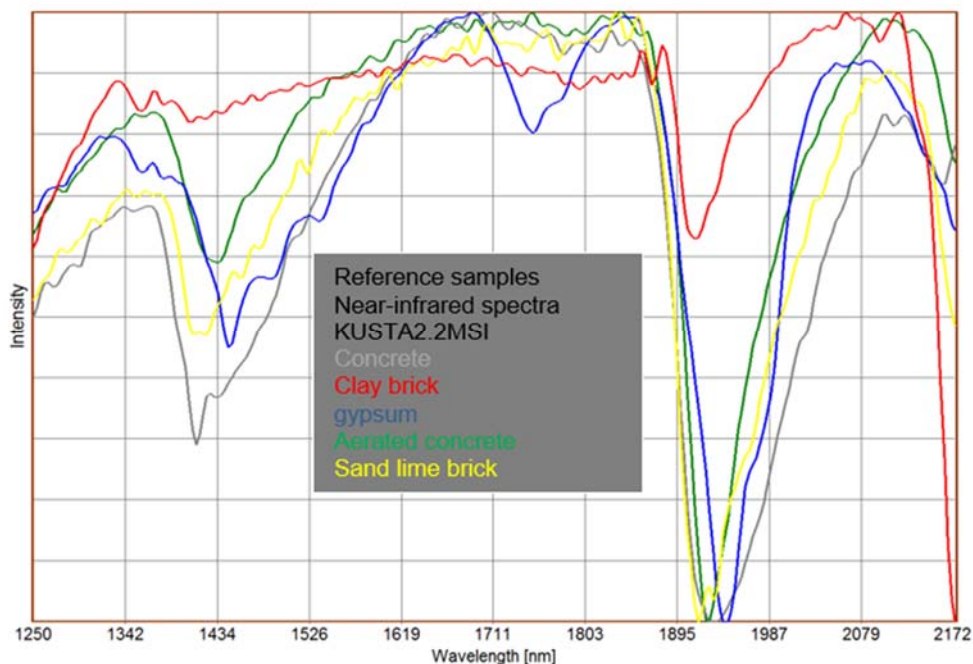
### 3.4 Entwicklung eines Prototyps für die NIR-Sortierung

In Kooperation mit den Unternehmen sesotec GmbH und LLA Instruments GmbH und dem IAB Weimar wurde das in Abbildung 10, rechts dargestellte Sortiersystem aufgebaut, welches Untersuchungen unter realen Bedingungen ermöglicht. Die Aufgabe- und die Ausblaseinheit wurde im Hinblick auf die mineralischen Bauabfälle angepasst.

Da die Messfrequenz unter realen Sortierbedingungen wesentlich höher als die eines Laborspektrometers ist, wurden in weiteren Untersuchungen die Spektren mit der hyperspektralen Kamera KUSTA2.2MSI untersucht. Diese Kamera und die entwickelte Auswerterroutine wurden in den Prototyp implementiert. Abbildung 11 zeigt die gemittelten Spektren für alle untersuchten Materialklassen.



**Abbildung 10: Laborspektrometer (links) und Prototyp einer Sortiermaschine für mineralische Bau- und Abbruchabfälle (rechts)**



**Abbildung 11: Vergleich der gemittelten NIR-Spektren aller untersuchten Materialklassen aufgenommen mit der Kamera KUSTA2.2MSI**

### 3.5 Untersuchung von Einflussgrößen auf die NIR-Sortierung

Die Vielzahl an Einflussgrößen bei der Sortierung lässt sich prinzipiell in die drei Gruppen Sortierung der Partikel mit Druckluftimpulsen, Erkennung der Partikel im NIR und Materialeigenschaften / Aufgabe und Vereinzelung der Partikel einteilen. Eine Übersicht über die wichtigsten Einflussgrößen gibt Abbildung 12. Ausgewählte Einflussparameter werden im Folgenden diskutiert.

Die anhand der Auswertelgorithmen berechnete Erkennungsrate stimmt nicht mit der real ermittelten Sortierrate überein. Im realen Sortierprozess werden nicht alle erkannten Partikel durch die Druckluftimpulse richtig aussortiert und es kommt zu einer Falschzuordnung.



Abbildung 12: Übersicht der Einflussgrößen bei der NIR-Sortierung

### 3.5.1 Sortierung von Modellgemischen

Die folgenden Versuche an Gemischen aus zwei Materialien im ungebrauchten Zustand zeigen den Unterschied zwischen Erkennungs- und Sortierrate. Wie in Abbildung 13 dargestellt, liegt die mittlere Sortierrate für Gips bei ca. 90 %, d.h. 10 % unter der berechneten Erkennungsrate. Eine Ausnahme stellt die wesentlich geringere Sortierrate für das Kalksandstein/Gips-Gemisch mit nur 72 % dar [20].

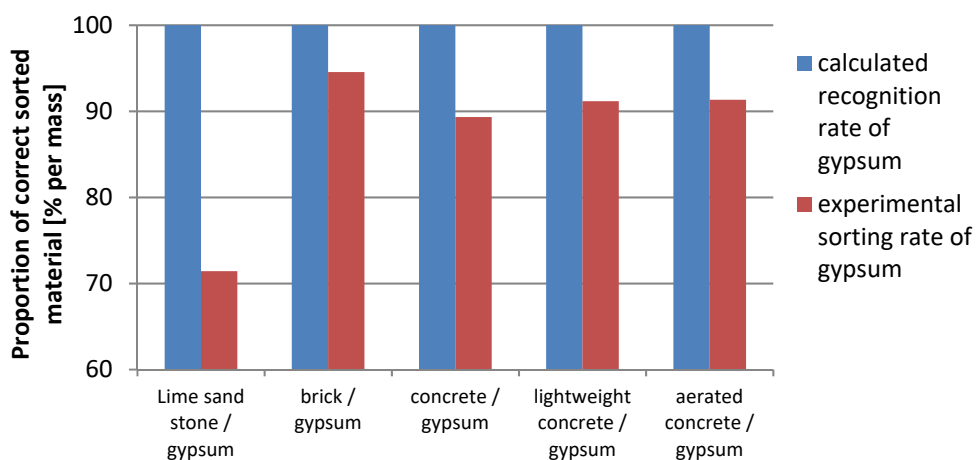
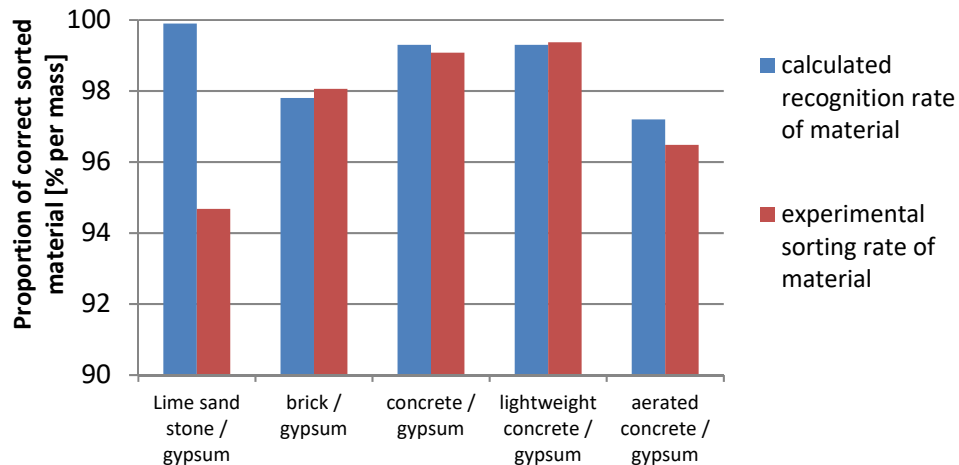


Abbildung 13: Vergleich der experimentell ermittelten Sortierrate und der berechneten Erkennungsrate für Gips

Zusätzlich wurden die berechneten Erkennungs- und die Sortieraten für das jeweilige Material miteinander verglichen (siehe Abbildung 14). Es ergaben sich für alle Materialien mit Ausnahme des Kalksandsteins kaum Unterschiede in den ermittelten Raten. Für Kalksandstein ergab sich eine um ca. 5 % geringere Sortierrate als Erkennungsrate. Alle Sortieraten liegen über 94 %. Die höchste Sortierrate von 99 % wurde für Beton und Leichtbeton erreicht. Die Abtrennung von Ziegel und Porenbeton ergab eine Sortierrate von 98 und 96,5 %.





**Abbildung 14: Vergleich der experimentell ermittelten Sortiertrate und der berechneten Erkennungsrate für die unterschiedlichen Baustoffe**

3.5.2 Sortierung von Praxisgemischen und Untersuchung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Sortiertrate

Ein aus unterschiedlichen Recyclingmaterialien zusammengestelltes Gemisch wurde in ofentrockenem und feuchtem Zustand sortiert.

Das Gemisch war wie folgt zusammengesetzt:

- 3,61 M.-% organisches Material
- 10,58 M.-% Gips
- 2,40 M.-% Porenbeton
- 10,82 M.-% Kalksandstein
- 17,55 M.-% Ziegel
- 55,04 M.-% Beton

Der Sortierprozess erfolgte in sechs Teilschritten, wobei im ersten Schritt organisches Material, wie Plastik und Holz abgetrennt wurde. Im zweiten Schritt wurde Gips und Gipskarton abgetrennt usw. Der Beton wurde im sechsten Schritt ebenfalls noch abgetrennt, was aus praktischer Sicht nicht relevant ist, jedoch für die Ermittlung der Sortiertrate wichtig. Erwartungsgemäß ist diese sehr gering. Die Ergebnisse für die Sortierung der trockenen Partikel sind in Tabelle 4 und die Ergebnisse für die Sortierung der feuchten Partikel in der Tabelle 5 dargestellt.

Beispielsweise wurden in Schritt 1, wie in Tabelle 4 gezeigt, 63 M.-% des eingewogenen organischen Materials (0,15 kg) auch als organisches Material aussortiert. Zusätzlich wurden 47 M.-% des eingewogenen Gipsmaterials als organisches Material detektiert, da der anhaftende Karton an Gipskartonplatten dem Papier zugeordnet wurde. Darüber hinaus wurden noch 3,4 M.-% des Kalksandsteins, 26,4 M.-% des Betons und 5,4 M.-% des Ziegels fälschlicherweise als organisches Material aussortiert. Das heißt, dass in Schritt 1 insgesamt 63 M.-% der als organischen Material eingewogenen Masse korrekt und 37 M.-% falsch ausgetragen wurden.

In Schritt 2 wurden 48,9 M.-% des eingewogenen Gipses aussortiert. Zusammen mit den 47 M.-% aus Schritt 1 ergab sich für Gips eine Sortiertrate von 95,8 M.-%. Nur 4,2 M.-% Gips gelangten in das Sortierprodukt.

Der Anteil an aussortiertem Ziegel ist mit 48,9 M.-% und insgesamt 77,3 M.-% relativ gering. Durch Anpassungen in der Erkennungssoftware war es möglich, den Ziegelanteil auf 84 M.-% zu erhöhen.

**Tabelle 4: Einzel- und Gesamtsortierdaten für die Sortierung des Gemisches 1 in trockenem Zustand**

Model mixture 1 (dry)									
		sample weight [kg]	weight of sorted out material [kg]	thereof organic [wt.-%]	thereof gypsum [wt.-%]	thereof aerated concrete [wt.-%]	thereof sand lime brick [wt.-%]	thereof brick [wt.-%]	thereof concrete [wt.-%]
1. step	organic material	0,15	0,63	63,0	47,0	0,0	3,4	26,4	5,4
2. step	gypsum plaster	0,44	0,24	0,2	48,9	0,0	6,0	0,0	0,0
3. step	aerated concrete	0,10	0,09	0,0	0,0	89,2	0,0	0,0	0,0
4. step	sand lime brick	0,45	0,40	0,5	0,0	0,0	86,0	2,0	0,0
5. step	brick	0,73	0,37	0,0	0,0	0,0	0,0	48,9	0,3
6. step	concrete	2,29	0,96	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42,1
content of sorted out material				63,8	95,8	89,2	95,5	77,3	47,8
content of material in the pass				36,2	4,2	10,8	4,5	22,7	52,2
Sum				100	100	100	100	100	100

**Tabelle 5: Einzel- und Gesamtsortierdaten für die Sortierung des Gemisches 1 in feuchtem Zustand**

Model mixture 1 (moist)									
		sample weight [kg]	weight of sorted out material [kg]	thereof organic [wt.-%]	thereof gypsum [wt.-%]	thereof aerated concrete [wt.-%]	thereof sand lime brick [wt.-%]	thereof brick [wt.-%]	thereof concrete [wt.-%]
1. step	organic material	0,15	0,14	33,6	6,2	0,0	0,0	2,3	2,2
2. step	gypsum plaster	0,45	0,43	1,1	87,2	0,0	0,0	0,0	1,7
3. step	aerated concrete	0,12	0,18	76,2	0,0	71,6	0,0	0,0	1,5
4. step	sand lime brick	0,48	0,06	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	0,0
5. step	brick	0,74	0,24	0,1	0,0	0,0	0,0	29,4	0,9
6. step	concrete	2,20	1,30	0,0	0,0	0,0	35,4	25,8	42,8
content of sorted out material				110,9	93,4	71,6	35,4	66,1	49,0
content of material in the pass				-10,9	6,6	28,4	64,6	33,9	51,0
Sum				100	100	100	100	100	100

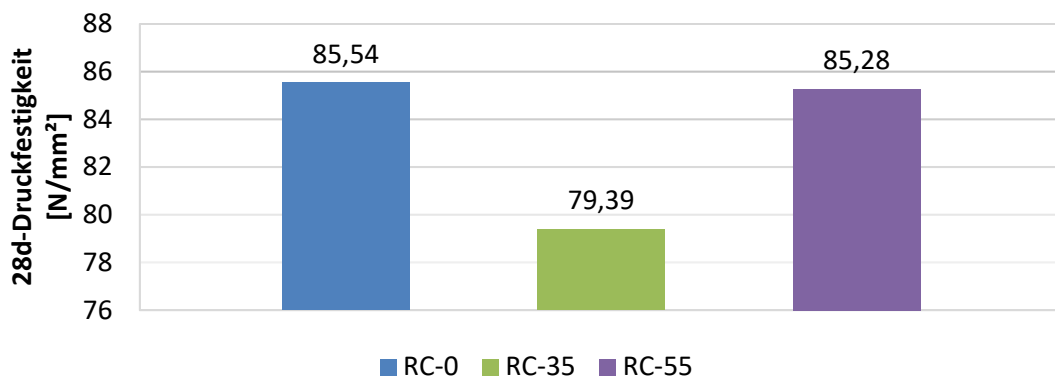
Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Sortierdaten für die meisten Materialien in feuchtem Zustand sinken. Ausnahme ist Gips – dieser kann in feuchtem Zustand sogar besser erkannt und sortiert werden. Für Beton hat die Feuchtigkeit offenbar keinen großen Einfluss. Kalksandstein kann in feuchtem Zustand nicht mehr erkannt werden.

Urakov [43] sortierte einen Mischabbruch mit der in Tabelle 6 angegebenen Zusammensetzung mittels NIR-Sortierung. Unerwünschte Anteile wie Gips, Holz und bitumenhaltige Materialien sind nur in kleinen Mengen enthalten. Die Anteile an Beton und Gesteinskörnung schwanken zwischen 65 % und 75 %. Das Gemisch entspricht somit weder Typ 1 noch Typ 2, da der Anteil an Beton und Gesteinskörnung zu gering und der Anteil an schwimmenden Material zu hoch ist. Ziel war es, durch die Positivsortierung gleichzeitig Beton- und Ziegelprodukte auszusortieren und dadurch Typ 2 zu erhalten. Es wurden insgesamt 195 kg Material sortiert, wovon 115 kg aussortiert wurden. Dies ergibt eine Ausbeute von 60 %. Gründe für die relativ geringe Ausbeute sind z.B. teilweises „Überlagern“ und „Springen“ der Partikel auf dem Förderband, sehr viele Ausblasvorgänge gleichzeitig und daraus resultierende Verwirbelungen. Eine weitere Möglichkeit wäre, die einzelnen Kategorien Rc+Ru und Rb einzeln abzutrennen und in einem gleichbleibenden Verhältnis wieder zusammenzufügen, was zu einer wirtschaftlicheren Ausbeute führen würde. Nach einem einmaligen Sortierdurchgang wurden die Anforderungen für Typ 2 mit Ausnahme des Anteils an schwimmenden Bestandteilen eingehalten. Die Sortierversuche zeigen teilweise eine relativ hohe Standardabweichung und müssten für eine kommerzielle Nutzung noch weiter optimiert werden.

**Tabelle 6: Stoffliche Zusammensetzung des Mischabbruchs vor und nach der NIR-Sortierung [43]**

	Vor der Sortierung [M.-%]	Typ 1 [M.-%]	Typ 2 [M.-%]	Nach der Sortierung [M.-%]	Standardabweichung [M.-%]
<i>Rc + Ru</i>	68,89	≥ 90	≥ 70	72,36	3,50
<i>Rb</i>	28,58	≤ 10	≤ 30	27,07	3,19
<i>Ra</i>	0,93	≤ 1	≤ 1	0,09	0,06
<i>Rg</i>	0,93	≤ 1	≤ 2	0,49	0,25
<i>X</i>	0,68				
<i>FL</i>	10,19 cm <sup>3</sup> /kg	≤ 2 cm <sup>3</sup> /kg	≤ 2 cm <sup>3</sup> /kg	2,70 cm <sup>3</sup> /kg	1,11 cm <sup>3</sup> /kg

Mit dem durch Sortierung erzeugtem RC-Materials wurden Betone hergestellt und hinsichtlich der Betoneigenschaften geprüft (Abbildung 15). Die Rezeptur RC-0 war eine vom Fertigteilwerk bereitgestellte Mustermischung. In der Mischung RC-35 wurden 35 Vol.-% der natürlichen Gesteinskörnung 2/16 mm durch das RC-Material ersetzt. Die Mischungen RC-55 wurde mit einem Anteil von 48 Vol.-% RC-Material 2/16 mm hergestellt ohne dabei die Sieblinie zu verändern. Auch der Sandanteil wurde mit 8 Vol.-% RC-Sand ersetzt. Der Zementanteil betrug 370 kg/m<sup>3</sup>. Zur Anwendung kam ein CEM II/A-S 52,5 R, welcher trotz des Einsatzes von RC-Material eine hohe Festigkeit garantiert.



**Abbildung 15: 28-Tage-Druckfestigkeiten der Betone mit anteiligem RC-Anteil [43]**

Obwohl der Beton RC-55 mehr RC-Material beinhaltet, ist die ermittelte Druckfestigkeit größer als die der RC-35 Mischung [43]. Mithilfe von Fließmittel kann die Konsistenz auch ohne Wasserzugabe trotz steigenden Wasserbedarfs reguliert werden. Somit wird die für die Fertigteilproduktion notwendige Frühfestigkeit erreicht. Unter den gegebenen Bedingungen kann davon ausgegangen werden, dass der Einbau vom RC-Material vom Typ 2 auch in größerer Menge als in der Norm erfolgen kann.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der eigenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass beide Spektren – VIS und NIR – ein hohes Potential für die Erkennung der Vielfalt an Bauschuttbestandteilen aufweisen. Eine zukünftige Kopplung beider Verfahren erscheint sinnvoll und soll Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

#### Literatur

- [1] Müller, A.; Linß, E.; Schulz, T.: Prognose zur Gipsmenge im Bauschutt. In: RECYCLING Magazin 09/2011, S. 26-31
- [2] Liebisch, M.: Untersuchungen zur aktuellen Zusammensetzung von Bauschutt. Bauhaus-Universität Weimar, 2015
- [3] Nüßler, S.: Verwertungsmöglichkeiten für mineralische Bau- und Abbruchabfälle und deren aktuelle Zusammensetzung. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2015

- [4] <http://www.redwave.at/produkte/redwave-rox/>, aufgerufen am 21.7.2016
- [5] BT-Wolfgang-Binder GmbH: Sortierung von Quarz: Farblich getrennt. Schüttgut Nr. 1, 2014
- [6] <http://www.lla.de/applikationen/mineraliensortierung.html>, aufgerufen am 22.8.2016
- [7] <http://www.rtt-zittau.de/>, aufgerufen am 31.8.2016
- [8] <http://www.steinertglobal.com/de/de/produkte/sensor-sortierung/>, aufgerufen am 31.8.2016
- [9] Feierabend, A.: Einsatz der NIR-Messtechnik für die Identifikation und Sortierung von Mürbsteinen. Vortrag am 10.3.2010 in Aachen, Tagung Sensorgestützte Sortierung 2010, Heft 122 der Schriftenreihe des GDMB
- [10] Zeiger, E.: Sortierung verschiedener Abfallströme mit Mogensen-Röntgensortiertechnik. In: Aufbereitungstechnik, Vol. 47, Nr. 3, S. 1-5, 2006
- [11] <http://www.mogensen.de/>, aufgerufen am 21.7.2016
- [12] <https://www.tomra.com/de/solutions-and-products/sorting-solutions/recycling/recycling-technology/>, aufgerufen am 21.7.2016
- [13] Kolacz, J.: Universell anwendbar. In AT Mineral processing, 01-02, 2013, Volume 54, S. 62 – 71
- [14] [http://www.comex-group.com/Comex/separation\\_and\\_recycling.html](http://www.comex-group.com/Comex/separation_and_recycling.html), aufgerufen am 21.7.2016
- [15] <http://www.secopta.de/anwendungen/mineralische-rohstoffe>, aufgerufen am 22.8.2016
- [16] www.c2ca.eu, EU-Forschungsprojekt C2CA, Laufzeit 01/2011 - 04/2015, aufgerufen am 16.8.2016
- [17] Bonifazi, G.; Pamieri, R.; Serranti, S.: Hyperspectral imaging applied to end-of-life (EOL) concrete recycling. 2. Internationale Konferenz zur Optischen Charakterisierung von Materialien (OCM-2015), 18. bis 19. März 2015, Karlsruhe
- [18] S. Serranti, R. Palmieri, and G. Bonifazi: Quality control based on SWIR and NIR hyperspectral imaging approaches: recovered aggregates from demolition waste recycling. Proc. 17th International Conference on Near Infrared Spectroscopy, NIR 2015, Foz do Iguacu, Brazil, October 18 - 23, 2015
- [19] [www.ircow.eu](http://www.ircow.eu), Laufzeit: 01/2011 - 12/2014, aufgerufen am 16.8.16
- [20] [www.hiserproject.eu](http://www.hiserproject.eu), Laufzeit: 02/2015 - 01/2019, aufgerufen am 16.8.2016
- [21] [www.cdw-recycling.eu](http://www.cdw-recycling.eu), Laufzeit: 08/2012 - 09/2015, aufgerufen am 16.8.2016
- [22] Vegas, I.; Broos, K.; Nielsen, P.; Lambertz, O.; Lisbona, A.: Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. Construction and Building Materials, Volume 75, 2015, S. 121 – 128
- [23] <http://www.lla.de/applikationen/muellersortierung-recycling.html>, aufgerufen am 21.7.2016
- [24] Linß, E.; Anding, K.; Schnellert, T.; Ludwig, H.-M.: Identification of Construction and Demolition Waste by Using Image Processing in the Visual and Near-infrared Spectrum, and Machine Learning Methods. Tagungsband der 18. iBausil, Weimar, 12.-15.09.2012
- [25] Linß, E.; Müller, A.; Anding, K.; Escher, M.: Qualitätsmerkmale von RC-Baustoffen. Vortrag zur Fachtagung Recycling R'10, 22. und 23. September 2010
- [26] Anding, K.; Garten, D.; Pieper, G.; Linß, G.; Linß, E.: Klassifikation mineralischer Baurohstoffe aus Lockergesteinslagerstätten mittels Bildverarbeitung und maschinellem Lernen. Vortrag, 16. Workshop Farbbildverarbeitung der German Color Group, 7.-8. Oktober 2010 in Ilmenau
- [27] Anding, K.; Linß, E.; Träger, H.; Rückwardt, M.; Göpfert, A.: Optical Identification of concrete and demolition waste by using processing and machine learning methods. In: Joint International IMEKO TC1 + TC7 + TC 13 Symposium, Jena, 31.8.-2.9.2011, Tagungsband
- [28] <http://www.halcon.com/>, aufgerufen am 25.8.2016
- [29] <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>, aufgerufen am 25.8.2016
- [30] Dr.-Ing. Elske Linß, Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig, Dr.-Ing. Katharina Anding: Study of the Identification of Aggregates of Construction and Demolition Waste by Using Object Recognition Methods, Vortrag IALCCE 2012, 6.-8. Oktober 2012, Wien
- [31] K. Anding, P. Kuritcyn, E. Linß and S. M. Latyev: Significant Characteristics in VIS- and IR-Spectrum of Construction and Demolition Waste for High-Precision Supervised Classification. Vortrag, 2<sup>nd</sup> International Conference on Optical Characterization of Materials (OCM 2015), Karlsruhe am 18-19.3.2015
- [32] Entwicklung eines Recyclingverfahrens für Mauerwerksbaustoffe auf Basis hyperspektraler Nahinfrarot-Sensorik, Zwischenbericht zum AiF-Forschungsprojekt KF3033025, Bauhaus-Universität Weimar, 2014
- [33] Landmann, Müller, Ulsen, Karrasch, Linß: Chemical-mineralogical sorting of mineral construction and demolition wastes for a better recovery. Vortrag, 1st Int. Conf. on Minerals in the Circular Economy, Espoo, Finland am 28.11.2014
- [34] Linß, E.; Landmann, M.; Karrasch, A.; Kaiser, F.: Sorting of mineral construction and demolition waste by using hyperspectral near-infrared sensor technology. Tagungsband der 19. Internationalen Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2015, Band 2, S. 275-290
- [35] Hollstein, F.; Cacho, I.; Arnaiz, S.; Wohllebe, M.: Challenges in Automatic Sorting of Construction and Demolition Waste by Hyperspectral Imaging. Konferenzbeitrag, 2016
- [36] Angulo, S.C.; John, V.M.; Ulsen, K.; Mueller, A.: Optical sorting of ceramic material from mixed construction and demolition waste aggregates. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 61-73, abr./jun. 2013. ISSN 1678-8621
- [37] Xia, H.; Bakker, M.: Quality of open air, single-shot LIBS spectra from waste particles. Vortrag, 2<sup>nd</sup> International Conference on Optical Characterization of Materials (OCM 2015), Karlsruhe am 18-19.3.2015
- [38] Mündliche Mitteilung von Han Xia auf der 2<sup>nd</sup> International Conference on Optical Characterization of Materials (OCM 2015), Karlsruhe am 18-19.3.2015

- [39] Clark, M. R. et al.: Thermal physic aspects of materials used for the construction of rural buildings in Soria (Spain). *NDT&E International*, v. 36, p. 265-275, 2003.
- [40] Tatzert, P. et al.: Industrial application for inline material sorting using hyperspectral imaging in the NIR range. *Real-Time Imaging*, v. 11, p. 99-107, 2005
- [41] Kuritcyn, P.; Anding, K.; Linß, E.; Latyev, S. M.: Increasing the Safety in Recycling of Construction and Demolition Waste by Using Supervised Machine Learning. *IMEKO 2014, Madeira*
- [42] Kazimova, S.: Sortierversuche mineralischer Bau- und Abbruchabfälle mittels NIR-Sensorik. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2014
- [43] Urakov, A.: Sensorgestützte Sortierversuche zur Herstellung rezyklierter Gesteinskörnungen unterschiedlicher Liefertypen und Versuche zur betontechnologischen Eignung. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2015