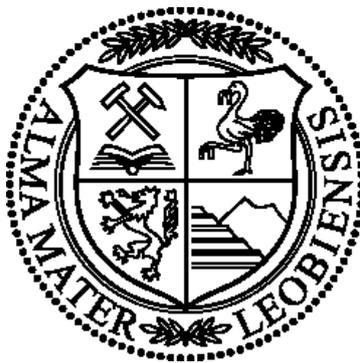


Weiterentwicklung optischer Sortiertechnik und
Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten in der
Aufbereitung primärer und sekundärer Rohstoffe



Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der montanistischen Wissenschaften
an der Montanuniversität Leoben

Vorgelegt von:

Dipl. Ing. Reinhold Huber / 2016

Betreuer: Univ.-Prof. DI Dr. mont. Helmut Flachberger, Lehrstuhl für
Aufbereitung und Veredlung

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote the thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Date

Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. Helmut Flachberger für die hervorragende Zusammenarbeit im Projekt, für das entgegengebrachte Vertrauen und die geduldige, motivierende Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Professor Dr. Karl Gatterer vom Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Technischen Universität Graz, der mir die Welt der Festkörperspektroskopie in verständlicher Weise nähergebracht hat und mich umsichtig unterstützt hat.

Dank gilt vor allem auch Herrn Dr. Karl Grabner als Vorstand der Binder+Co AG für die Ermöglichung dieses Projekts, sein Verständnis für meine nebenberufliche wissenschaftliche Arbeit und geduldige Unterstützung.

Des Weiteren möchte ich mich für das Verständnis und die große Unterstützung seitens meiner Mitarbeiter der Abteilung für Forschung und Entwicklung der Binder+Co AG bedanken. Hier möchte ich mich insbesondere für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung, der Probenanalyse und für die Datenbereitstellung bedanken.

Ein großer Dank gilt ebenso den ehemaligen Diplomanden Herrn DI Georg Weingrill und Herrn DI Johannes Hofer für die zahlreichen Inputs und ihr Engagement.

Der größte und wichtigste Dank soll meiner Frau, Irene Huber, gebühren, die mir in jeder Lage während des nebenberuflichen Verfassens dieser Arbeit kompromisslos zur Seite gestanden ist und mir mit ihrer positiven Einstellung die notwendige Motivation zum Durchhalten und Abschließen geben konnte.

Die Arbeit selbst widme ich meiner Tochter Antonia in Erinnerung daran, dass uns nicht Probleme, sondern Herausforderungen erwarten, welche wir bewältigen dürfen und können.

Kurzfassung

Der Einsatz der sensorgestützten Sortierung hat insbesondere die Aufbereitung sekundärer Rohstoffe revolutioniert. Selten hat die Einführung einer neuen Technologie in so kurzer Zeit zu einer so kompletten Neuorientierung in der Verfahrenstechnik geführt wie in diesem Fall. Im Gegensatz dazu ist der Einsatz sensorgestützter Sortierer in der Aufbereitung primärer Rohstoffe, wie Industrieminerale, Salze und Erze, noch eher unbedeutend, wobei eine steigende Tendenz zu beobachten ist. Insbesondere für die Aufbereitung von primären Rohstoffen stellt die Entwicklung von leistungsfähigen und spezifisch angepassten sensorgestützten Sortiersystemen eine große Chance dar.

Eine von der Binder+Co AG – einem innovativen, österreichischen Hersteller von Aufbereitungs- und Sortiermaschinen - initiierte und geführte Forschungskoooperation widmete sich in einem mehrjährigen Projekt der Aufgabe, materialspezifische optische Effekte und neue Technologien, im Speziellen für die optische Sortierung von Altglas und Industriemineralen, zu erforschen. Wesentliche Kooperationspartner waren der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben und das Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der TU Graz. Die materialspezifischen Absorptionseigenschaften im visuellen und den angrenzenden Wellenlängenbereichen von 200 bis 2.500 nm und UV-induzierte Fluoreszenz standen dabei im Fokus. In der vorliegenden Arbeit werden relevante Forschungsergebnisse und daraus abgeleitete Sensorentwicklungen dargestellt.

Ausgehend vom Stand der Technik und einer Analyse der Einsatzmöglichkeiten und –grenzen der farbbasierten Sortierung konnten in umfangreichen spektralen Untersuchungen und Analysen unter anderem optische Unterscheidungsmerkmale unter Nutzung des UV-Wellenlängenbereiches identifiziert und in der sensorgestützten Sortierung angewendet werden. Die Nutzung mehrerer spezifischer optischer Eigenschaften im genannten Wellenlängenbereich war dabei wesentlich für die Industriesensorentwicklung. Basis der technischen Umsetzung ist ein neu entwickeltes Sensorfusionskonzept mit komplexer und hierarchischer Merkmalsverknüpfung. Der aufbereitungstechnische Nutzen beim Einsatz der neuartigen Sortiertechnik wurde anhand von geplanten oder realisierten Einsatzbeispielen dargestellt und diskutiert. Das jeweilige Sortierverfahren stellt dabei nur ein Element einer wirtschaftlichen Gesamtlösung dar. Eine entscheidende Rolle fällt, wie auch bei klassischen Trennverfahren, der vorgelagerten Rohgutkonditionierung zu. Die Forschungsergebnisse haben den Validierungs- und Entwicklungsprozess der Binder+Co AG nachhaltig beeinflusst.

Abstract

The application of sensor-based sorting has especially revolutionised the processing of secondary raw materials. Hardly ever before, a new technology has led to such a complete realignment in process engineering as in this case in such a short time. In opposition to this, the application of sensor-based sorting still plays a rather minor role in the processing of primary raw materials like industrial minerals, salt and ores. However, there seems to be an upward trend. Especially in the processing of primary raw materials, the development of high-performance and specifically adjusted sensor-based sorting systems opens up many possibilities.

During a multi-year project, a research co-operation, which has been initiated and chaired by Binder+Co AG, Gleisdorf, Austria – an innovative producer of processing machines and sensor-based sorters – dedicated itself to research material specific optical effects and new technologies, especially in optical sorting of waste glass and industrial minerals. The main co-operation partners in this project were the Chair of Mineral Processing at the Montanuniversität Leoben, Austria and the Institute of Physical and Theoretical Chemistry at the Graz University of Technology, Austria. The research project focused on exploring absorption properties in the visual and contiguous wavelength ranges (200 – 2500 nm) and UV-induced fluorescence. This dissertation gives an overview of research results obtained and technological developments evolved from the project.

During extensive examinations and analyses optical differences were identified and successfully applied in the optical sorting, based on the state of art technology and an analysis of fields and limits of applications of color-based sorting, by using the UV wavelength range. The use of more than one specific optical characteristic in the mentioned wavelength range was crucial in the development of industrial sensors. The basis of this was a newly developed sensor fusion technology with complex and hierarchical combination of characteristics. The advantages for the processing technology by using the new sorting technology is described and discussed by means of planned or realized applications. In each case the sorting process is only one part of a complete economic solution. The pre-conditioning of the raw-material plays – as in typical separation processes – a decisive role. The research results have had an impact on the validity- and research-process at Binder+Co AG in a sustainable manner.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Zusammenfassung..... | 11 |
| 1.1 | Ausgangssituation..... | 11 |
| 1.2 | Aufgabenstellung | 11 |
| 1.3 | Ergebnisse und Relevanz..... | 12 |
| 1.3.1 | Innovationsstrategie | 12 |
| 1.3.2 | Einsatzfeld und Grenzen VIS-basierter Sortierung | 13 |
| 1.3.3 | Konzeptionierungsverfahren und erweiterte Rohgutanalyse..... | 15 |
| 1.3.4 | Spektrale Rohgutanalysen in Hinblick auf eine sortiertechnische Nutzung | 17 |
| 1.3.4.1 | NIR-basierte Klassifizierung von mineralischen Rohstoffen..... | 17 |
| 1.3.4.2 | UV- oder NIR-basierte Klassifizierung von Altglas..... | 18 |
| 1.3.4.3 | Lumineszenz-basierte Klassifizierung | 19 |
| 1.3.5 | Neuentwickelte Sensoriken | 21 |
| 1.3.6 | Einsatzerfahrungen mit Sensorfusionssensorik..... | 23 |
| 1.4 | Abschlussbetrachtung und Ausblick | 25 |
| 2 | Einleitung..... | 26 |
| 2.1 | Forschungsansatz..... | 26 |
| 2.2 | Aufgabenstellung | 28 |
| 2.3 | Innovationsstrategie | 28 |
| 3 | Historischer Rückblick und Trends | 31 |
| 4 | Sensorische Grundlagen | 34 |
| 4.1 | Überblick..... | 34 |
| 4.2 | Elektromagnetische Strahlung..... | 36 |
| 4.3 | Wechselwirkung zwischen Licht und Festkörpern – makroskopisch | 38 |
| 4.4 | Wechselwirkung zwischen Licht und Festkörpern – atomar..... | 40 |
| 4.4.1 | Festkörperchemie und –struktur..... | 41 |
| 4.4.1.1 | Übersicht zur Glasstruktur und -arten..... | 43 |
| 4.4.1.2 | Definition und Einteilung der Minerale | 45 |
| 4.4.2 | Streuung und Interferenz an Mikrostrukturen | 46 |
| 4.4.3 | Absorption..... | 47 |
| 4.4.3.1 | Bandstruktur und -übergänge..... | 47 |
| 4.4.3.2 | Farbzentren..... | 50 |
| 4.4.3.3 | Kristallfeldeffekte..... | 51 |
| 4.4.3.4 | Ladungsübertragung (Charge-Transfer-Übergänge) | 54 |
| 4.4.3.5 | Schwingungsanregung von Gruppen | 55 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.4.4 | Lumineszenz | 57 |
| 4.5 | Detektion | 63 |
| 5 | Stand der Technik – optische Sortierung | 65 |
| 5.1 | Prozesseinbindung und Zielsetzung für den Einsatz sensorgestützter Sortierer | 66 |
| 5.1.1 | Kenngrößen | 66 |
| 5.1.1.1 | Bilanzrechnung | 67 |
| 5.1.1.2 | Systembeschreibende Kennwerte | 69 |
| 5.1.1.3 | Leistungs- und Garantieparameter | 72 |
| 5.1.2 | Aufgabegutkonditionierung | 72 |
| 5.2 | Funktionsprinzip und Ausführungsformen | 74 |
| 5.2.1 | Funktionsmodell | 74 |
| 5.2.2 | Maschinenbaukonzepte | 75 |
| 5.2.2.1 | Rutschensortierer | 75 |
| 5.2.2.2 | Bandsortierer | 77 |
| 5.2.2.3 | Sondertypen | 79 |
| 5.2.3 | Technologische Aspekte für eine hohe Sortiereffizienz | 81 |
| 5.3 | Baugruppen optischer Sortierer und deren Funktion | 84 |
| 5.3.1 | Vereinzelungs- und Transportsystem | 85 |
| 5.3.2 | Aufbau und Funktion von optischen Sensoriken | 87 |
| 5.3.2.1 | Detektion und Bildaufnahme | 88 |
| 5.3.2.2 | Sensoren für die optische Sortierung | 91 |
| 5.3.2.3 | Beleuchtungstechnik | 95 |
| 5.3.2.4 | Strahlungsquellen | 97 |
| 5.3.3 | Signal- und Datenverarbeitungssystem | 102 |
| 5.3.3.1 | Bilddatenverarbeitung bei optischer Sortierung | 102 |
| 5.3.3.2 | Farbraum und Farbklassentabelle | 104 |
| 5.3.3.3 | Fallbeispiel zur Bilddatenverarbeitung bei Glasscherbensortierung | 107 |
| 5.3.3.4 | Bilddatenverarbeitung bei einfachen Multisensorsystemen | 109 |
| 5.3.4 | Effektorik | 110 |
| 6 | Einsatz und -grenzen VIS-basierter Sortierung | 116 |
| 6.1 | VIS-basierte Sortierung bei Binder+Co AG | 116 |
| 6.1.1 | CLARITY® | 117 |
| 6.1.2 | MINEXX® | 118 |
| 6.2 | Voraussetzung für den Einsatz optischer Sortierung | 120 |
| 6.3 | Praktische Vorgangsweise bei Machbarkeitsuntersuchungen | 125 |
| 6.4 | Fallbeispiele | 126 |
| 6.4.1 | Altglassortierung | 127 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 6.4.1.1 | Konditionierung | 127 |
| 6.4.1.2 | Sortiergut- und Zielqualitäten | 130 |
| 6.4.1.3 | KSP-Abtrennung und Herstellung von Farbfractionen aus Mischglas | 133 |
| 6.4.1.3.1 | Spezifische optische Eigenschaften | 134 |
| 6.4.1.3.2 | Versuchsdurchführung | 135 |
| 6.4.1.3.3 | Ergebnisse | 136 |
| 6.4.1.4 | Sonderglassortierung | 140 |
| 6.4.1.4.1 | Spezifische optische Eigenschaften | 143 |
| 6.4.1.4.2 | Versuchsdurchführung | 145 |
| 6.4.1.4.3 | Ergebnisse | 145 |
| 6.4.2 | Quarzkies | 145 |
| 6.4.2.1 | Sortiergut- und Zielqualitäten | 145 |
| 6.4.2.2 | Optische Eigenschaften und Detektionstechnik | 147 |
| 6.4.2.3 | Konditionierung und Sortierprozess | 148 |
| 6.4.2.4 | Versuchsdurchführung | 149 |
| 6.4.2.5 | Ergebnisse | 150 |
| 6.4.3 | Quarzsotter | 151 |
| 6.4.3.1 | Sortiergut- und Zielqualitäten | 152 |
| 6.4.3.2 | Optische Eigenschaften und Detektionstechnik | 153 |
| 6.4.3.3 | Effektorik und Trennraum für schwere große Objekte | 154 |
| 6.4.3.4 | Konditionierung und Sortierprozess | 158 |
| 6.4.3.5 | Versuchsdurchführung | 158 |
| 6.4.3.6 | Ergebnisse | 158 |
| 6.4.4 | Quarzbruch | 160 |
| 6.4.4.1 | Sortiergut und Zielsetzungen | 160 |
| 6.4.4.2 | Optische Eigenschaften und Detektionstechnik | 161 |
| 6.4.4.3 | Konditionierung und Sortierprozess | 164 |
| 6.4.4.4 | Versuchsdurchführung | 166 |
| 6.4.4.5 | Ergebnisse | 166 |
| 6.4.5 | Magnesitbruch | 169 |
| 6.4.5.1 | Sortiergut und Zielsetzungen | 169 |
| 6.4.5.2 | Optische Eigenschaften und Detektionstechnik | 171 |
| 6.4.5.3 | Konditionierung und Sortierprozess | 173 |
| 6.4.5.4 | Versuchsdurchführung | 174 |
| 6.4.5.5 | Ergebnisse | 175 |
| 6.4.6 | Steinsalz | 180 |
| 6.4.6.1 | Sortiergut und Zielsetzungen | 180 |
| 6.4.6.2 | Optische Eigenschaften und Detektionstechnik | 183 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.4.6.3 | Konditionierung und Sortierprozess..... | 185 |
| 6.4.6.4 | Versuchsdurchführung | 186 |
| 6.4.6.5 | Ergebnisse | 186 |
| 6.4.6.6 | Anlageninstallation | 188 |
| 6.5 | Diskussion und Bewertung | 189 |
| 7 | Weiterentwickeltes Konzeptionierungsverfahren | 191 |
| 7.1 | Erweiterte Rohgutanalyse | 193 |
| 7.1.1 | Analysemethoden | 194 |
| 7.1.1.1 | Physikalische Eigenschaften und Granulometrie..... | 194 |
| 7.1.1.2 | Stoff- und Materialbestand | 195 |
| 7.1.1.3 | Spektrale Eigenschaften | 195 |
| 7.1.1.4 | Wasseraufnahmefähigkeit..... | 196 |
| 7.1.1.5 | Transporteigenschaften..... | 199 |
| 7.1.2 | Probenbeschaffung, -beschaffenheit und -präparation | 199 |
| 7.2 | Wissensmanagement..... | 200 |
| 7.2.1 | Rohgutdatenbank - VerDaBa©..... | 201 |
| 7.2.1.1 | Datenbankaufbau..... | 201 |
| 7.2.1.2 | Bedienoberfläche (GUI)..... | 202 |
| 7.2.2 | Musterarchivierung..... | 204 |
| 8 | Ergebnisse von spektralen Rohgutanalysen relevanter Proben..... | 205 |
| 8.1 | Reflexion - UV/VIS/NIR | 205 |
| 8.1.1 | Spektrale Analysen von Fallbeispielen | 206 |
| 8.1.1.1 | Gips-/Anhydritbruch – M058..... | 206 |
| 8.1.1.2 | Kalkstein – M001..... | 207 |
| 8.1.1.3 | Magnesitbruch - M010..... | 209 |
| 8.1.1.4 | Talkbruch – M003 | 210 |
| 8.1.1.5 | Quarzbruch – M014 | 212 |
| 8.1.2 | Fazit zur NIR-basierten Klassifizierung von mineralischen Rohstoffen | 213 |
| 8.2 | Transmission - UV/VIS/NIR | 214 |
| 8.2.1 | Spektrale Analyse von Altglas | 214 |
| 8.2.1.1 | Absorptionskante relevanter Glasarten | 216 |
| 8.2.1.2 | Transmission Glas vs. KSP | 219 |
| 8.2.2 | Fazit zur UV- oder NIR-basierten Klassifizierung von Altglas | 220 |
| 8.3 | UV-angeregte Lumineszenz | 221 |
| 8.3.1 | Ermittlung von Anregungs- und Emissionsspektren | 221 |
| 8.3.2 | Bestrahlungsstärke | 225 |
| 8.3.3 | Quantenausbeute..... | 226 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 8.3.4 | Lebensdauer | 227 |
| 8.3.5 | Spektrale Analysen von Fallbeispielen | 229 |
| 8.3.5.1 | Altglas | 229 |
| 8.3.5.2 | Fluoritbruch - M045 | 232 |
| 8.3.5.3 | Schwer-/Flussspatbruch - M002 | 234 |
| 8.3.5.4 | Scheelit - M029 | 236 |
| 8.3.5.5 | Kalksteinbruch - M001 | 237 |
| 8.3.5.6 | Magnesitbruch - M010 | 239 |
| 8.3.5.7 | Rohrubine/Korund - M115 | 240 |
| 8.3.6 | Fazit zur lumineszenz-basierten Klassifizierung | 242 |
| 9 | Neuentwickelte Sensoriken | 243 |
| 9.1 | NIR-basierte Sensoriken | 243 |
| 9.2 | UV-basierte Sensoriken | 244 |
| 9.2.1 | Grundlegendes Lösungskonzept | 246 |
| 9.2.2 | UV/VIS-Transmission | 248 |
| 9.2.3 | Lumineszenz in Kombination mit VIS-Transmission | 252 |
| 9.2.4 | Lumineszenz in Kombination mit NIR-Transmission | 256 |
| 9.2.5 | Industrielle Umsetzung und maschinenbauliche Integration | 261 |
| 10 | Einsatzerfahrungen mit Sensorfusionssensorik | 265 |
| 10.1 | Altglassortierung | 265 |
| 10.1.1 | Sortiergut- und Zielqualitäten | 265 |
| 10.1.2 | Konditionierung | 266 |
| 10.1.3 | KSP- und Glaskeramik-Abtrennung aus Mischglas | 267 |
| 10.1.3.1 | Verfahrenskonzept | 267 |
| 10.1.3.2 | Versuchsdurchführung | 268 |
| 10.1.3.3 | Ergebnisse und Diskussion | 269 |
| 10.1.4 | Blei-Silikatglas-Abtrennung aus Weißglas | 272 |
| 10.1.4.1 | Verfahrenskonzept | 273 |
| 10.1.4.2 | Versuchsdurchführung | 274 |
| 10.1.4.3 | Ergebnisse und Diskussion | 275 |
| 10.2 | Industriemineralsortierung | 279 |
| 10.2.1 | Trennung von Schwerspat-/Flussspat | 280 |
| 10.2.1.1 | Sortiergut- und Zielqualitäten | 282 |
| 10.2.1.2 | Verfahrenskonzept | 283 |
| 10.2.1.3 | Versuchsdurchführung | 284 |
| 10.2.1.4 | Ergebnisse und Diskussion | 285 |
| 10.2.2 | Konzentration von Rohrubinen und Korunden | 287 |

| | | |
|-----------|--------------------------------------|------------|
| 10.2.2.1 | Sortiergut- und Zielqualitäten | 288 |
| 10.2.2.2 | Verfahrenskonzept | 288 |
| 10.2.2.3 | Versuchsdurchführung | 289 |
| 10.2.2.4 | Ergebnisse und Diskussion | 290 |
| 11 | Ausblick | 293 |
| | Literaturverzeichnis | 295 |
| | Verwendete Abkürzungen..... | 304 |
| | Anhang..... | 306 |

1 Zusammenfassung

1.1 Ausgangssituation

Der Bedarf an mineralischen Rohstoffen ist weltweit stark im Steigen begriffen (1), eine generelle Änderung dieses Trends ist nicht abzusehen. Begleitend zur Suche und Erschließung von neuen Rohstoffquellen steigt der Druck, die zum Einsatz gelangenden Aufbereitungsprozesse und -technologien für primäre und sekundäre Rohstoffe zu optimieren und deren Effizienz zu erhöhen.

Wesentlich für eine effiziente Aufbereitung und Veredlung sind dabei die zur Verfügung stehenden Trenn- und Sortiertechniken für Schüttgüter. Traditionelle Verfahren alleine stoßen dabei mehr und mehr an ihre technischen und ökonomischen Grenzen. Die sensorgestützte Sortierung stellt dazu eine interessante trenntechnische Alternative dar und eröffnet vielfältige Konfigurationsvarianten sowie Einsatzmöglichkeiten.

Die einfache optische bzw. VIS-basierte wie auch die nahinfrarot-basierte Sortierung haben als Teilgebiete der sensorgestützten Sortierung insbesondere die Aufbereitung sekundärer Rohstoffe in den letzten zwei Dekaden revolutioniert. Höhere Qualitätsanforderungen der weiterverarbeitenden Industrie einerseits und neue Störstoffe in den Konsum- und Industrieabfällen andererseits, führen kontinuierlich zu neuen spezifischen Trennaufgaben.

Im Gegensatz dazu ist der Einsatz sensorgestützter Sortiertechniken in der Aufbereitung primärer Rohstoffe wie Industrieminerale, Salze und Erze gegenwärtig noch vergleichsweise unbedeutend. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass die verfügbaren, aber vorwiegend für die Recyclingindustrie oder Lebensmittelindustrie entwickelten, sensorgestützten Sortiersysteme nur beschränkt in der Aufbereitung primärer Rohstoffe einsetzbar sind.

Insbesondere für die Aufbereitung primärer Rohstoffe stellt die Entwicklung von leistungsfähigen und spezifisch angepassten sensorgestützten Sortiersystemen eine große Chance dar.

1.2 Aufgabenstellung

Diese Arbeit verfolgt einen neuen sensortechnischen Ansatz unter Einbeziehung eines erweiterten Wellenlängenbereiches von 200 nm – 2.500 nm, der dort zur Anwendung

kommen kann, wo einfache optische bzw. VIS-basierte Sortiertechniken, welche im visuellen Wellenlängenbereich von 400 nm – 780 nm arbeiten, eingeschränkt funktioniert. Diese neuartige Sensortechnik soll somit im Sinne der Einleitung einen Beitrag zur effizienteren Aufbereitung von primären und sekundären Rohstoffen leisten und die Einsatzmöglichkeiten der sensorgestützten Sortierung erweitern.

Die wesentlichen Arbeitspakete können wie folgt zusammengefasst werden:

- **Bewertung der Einsatzgrenzen** klassischer VIS-basierter Sortiertechnik.
- **Einwicklung und Durchführung einer erweiterten Rohgutanalyse**, welche relevante Eigenschaften in Hinblick auf den Einsatz von sensorgestützter Sortiertechnik in einem erweiterten optischen Wellenlängenbereich von 200 bis 2.500 nm umfasst.
- **Entwicklung einer alternativen industrietauglichen Sensortechnik** zur Einzelkornsortierung unter Nutzung des UV-Wellenlängenbereiches.
- **Evaluierung der Sortiereffizienz durch Technikums- und Industrierversuche** im Bereich der primären und sekundären Rohstoffaufbereitung.

1.3 Ergebnisse und Relevanz

1.3.1 Innovationsstrategie

Die Komplexität der Aufgabenstellung erforderte eine interdisziplinäre Kopplung der Fachbereiche „Festkörperspektroskopie“ und „Aufbereitungstechnik“. Für die eigentliche Sensorikentwicklung sind hingegen Disziplinen wie „Sensorikdesign“, „Bildverarbeitung“, „Automatisierungstechnik“ und „Maschinenbau“ wesentlich.

Ein von der Binder+Co AG initiierte und geführte Forschungskoooperation widmete sich in einem mehrjährigen übergeordneten Projekt der Aufgabe, materialspezifische optische Effekte und neue Technologien zu erforschen und zu entwickeln. Kooperationspartner waren unter anderem der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben, das Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der TU Graz, das IOSB Fraunhofer in Karlsruhe, spezialisierte Technologielieferanten und Aufbereitungsunternehmen aus unterschiedlichen Industrien. Auf Basis der „open innovation“ brachten die in unterschiedlichen Bereichen tätigen Forschungspartner ihr Fachwissen aus den jeweiligen Disziplinen in das Projekt mit ein.

Aufbauend auf die systematischen Grundlagenforschungen zu materialspezifischen optischen Effekten und Rohgutanalysen wurde ein neuer genereller Lösungsansatz „kombinierte Anregung und Detektion mehrerer klassifizierungsrelevanter optischer Effekte über einen erweiterten Wellenlängenbereich“ definiert. In mehreren Teilprojekten zu konkreten Sortieraufgabenstellungen wurden sodann die Sensortechnik und Komponenten entwickelt sowie in Sortiermaschinen integriert. Die Laufzeit der Teilprojekte betrug zwischen ein und zwei Jahre. Zur Fortschrittsbewertung und Risikominimierung wurden entsprechend den Prozessvorgaben der Binder+Co AG Meilensteinreviews zwischen den Projektphasen durchgeführt.

1.3.2 Einsatzfeld und Grenzen VIS-basierter Sortierung

Die Versuchsreihen mit Altglas und mineralischen Rohgutarten wie Quarzkies, Quarzbruch, Magnesit, Kalkstein, Talk und Steinsalz wurden auf VIS-basierten Rutschensortiersystemen der Binder+Co AG durchgeführt und beispielhaft in dieser Arbeit dokumentiert. Die getesteten Sortierer im Speziellen und Rutschensortierer generell, welche auf dem in Abbildung 1 dargestellten Funktionsphasenmodell basieren, zeichnen sich durch einen modularen und flexiblen Aufbau sowie ein vielfältiges Einsatzspektrum aus.

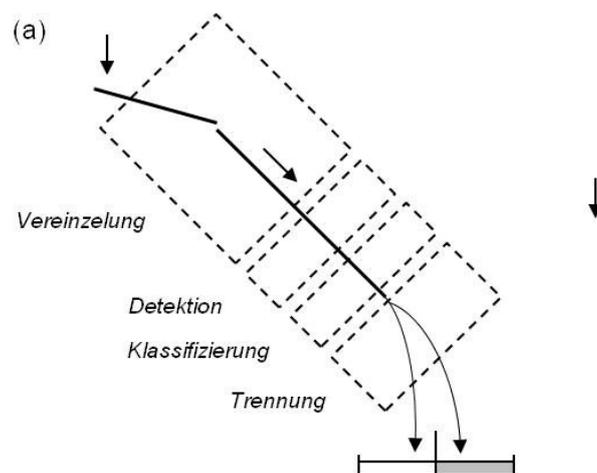


Abbildung 1: Funktionsphasenmodell eines Rutschensortierers; Quelle: (2), adaptiert

Die umfangreichen Versuchsreihen und Einsatzerfahrungen mit VIS-basierten Rutschensortiersystemen haben gezeigt, dass viele Qualitätsanforderungen von Zwischen- und Endprodukten wie Farbreinheit, Weißegrad, Wertstoff- oder/und Störstoffgehalt mit VIS-basierten Sortierern unterschiedlichster Ausführung erreicht werden können. Durch

Weiterentwicklung der Komponenten und Entwicklung neuer Ausrüstungsvarianten im Rahmen des Forschungsprojektes, wie beispielsweise

- zweiseitiger Reflexionsdetektion mit kombinierter Auswertung,
- Reflexion- und Transmissionsdetektion mit kombinierter Auswertung,
- örtlich und zeitlich hochauflösender Detektion,
- zweireihiger Effektorik mit schwerpunktssymmetrischer Ventilansteuerung und
- örtlich feinsegmentierter Effektorik mit schnellschaltenden Sortierventilen,

konnten die Einsatzmöglichkeiten der VIS-basierten Sortierung insbesondere in der Primärrohstoffaufbereitung verbessert und ausgeweitet werden. Sie sind nun bereits Kernaggregate in verschiedenen Aufbereitungsprozessen. Das Einsatzfeld erweitert sich zunehmend und ermöglicht die Verarbeitung eines breiten Korngrößenspektrums von etwa 1 bis 150 mm.

Wie in Versuchen gezeigt werden konnte und sich im praktischen Einsatz bestätigt, können durch Klassierung und spezielle Konditionierungsmethoden wie Nass-, Trockenreinigung oder/und Benetzung mit H₂O optische bzw. farbliche Merkmalseigenschaften verstärkt und Signalstreuungen minimiert werden. Dies drückt sich in einer höheren Klassifizierungsgüte und letztlich in Trennungsgraden von bis zu über 95 % aus.

Wie auch bei klassischen Trennverfahren und wie am Beispiel der Steinsalzsartierung gezeigt werden konnte, ist der Aufschlussgrad ein entscheidender und/oder limitierender Faktor bezüglich des realisierbaren Trennungsgrads. Sofern die dreidimensionalen Verwachsungsverhältnisse – unter Berücksichtigung der gegebenen statistischen Unschärfe – in den Bilddaten zweidimensional abgebildet werden, kann die Trennschnittlage innerhalb der Menge verwachsener Körner mittels Parametrierung der Sortierer gut angepasst werden.

Einfache optische bzw. VIS-basierte Sortierer sind aber auch oft wenig oder nicht geeignet, wenn - wie am Beispiel von Sonderglas oder Magnesitbruch gezeigt wurde - keine hinreichende optische Differenzierung der Qualitätsklassen bei Bestrahlung mit sichtbarem Licht gegeben ist. Insbesondere bei Primärrohstoffen mit einer starken Abhängigkeit der optischen Eigenschaften von der Lagerstättengenese trifft dies häufig zu. Im Vergleich zu

künstlich hergestellten Materialien in gesammelten Reststoffen variieren die optischen Eigenschaften auch für ähnliche Rohgutarten deutlich stärker und ist die Verknüpfung mit qualitätsbestimmenden Eigenschaften sehr individuell. Dies bestätigen die, im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten, Analysen von Rohgut-, Zwischenprodukt- und Reststoffmustern.

1.3.3 Konzeptionierungsverfahren und erweiterte Rohgutanalyse

Für die Binder+Co AG wurde im Zuge der Forschungsarbeit der für Maschinenbauer sehr typische und stark auf das bestehende Produktportfolio bezogene Validierungsprozess weiterentwickelt. Der nun etablierte Validierungs- und Konzeptionierungsprozess ist dazu in Abbildung 2 dargestellt.

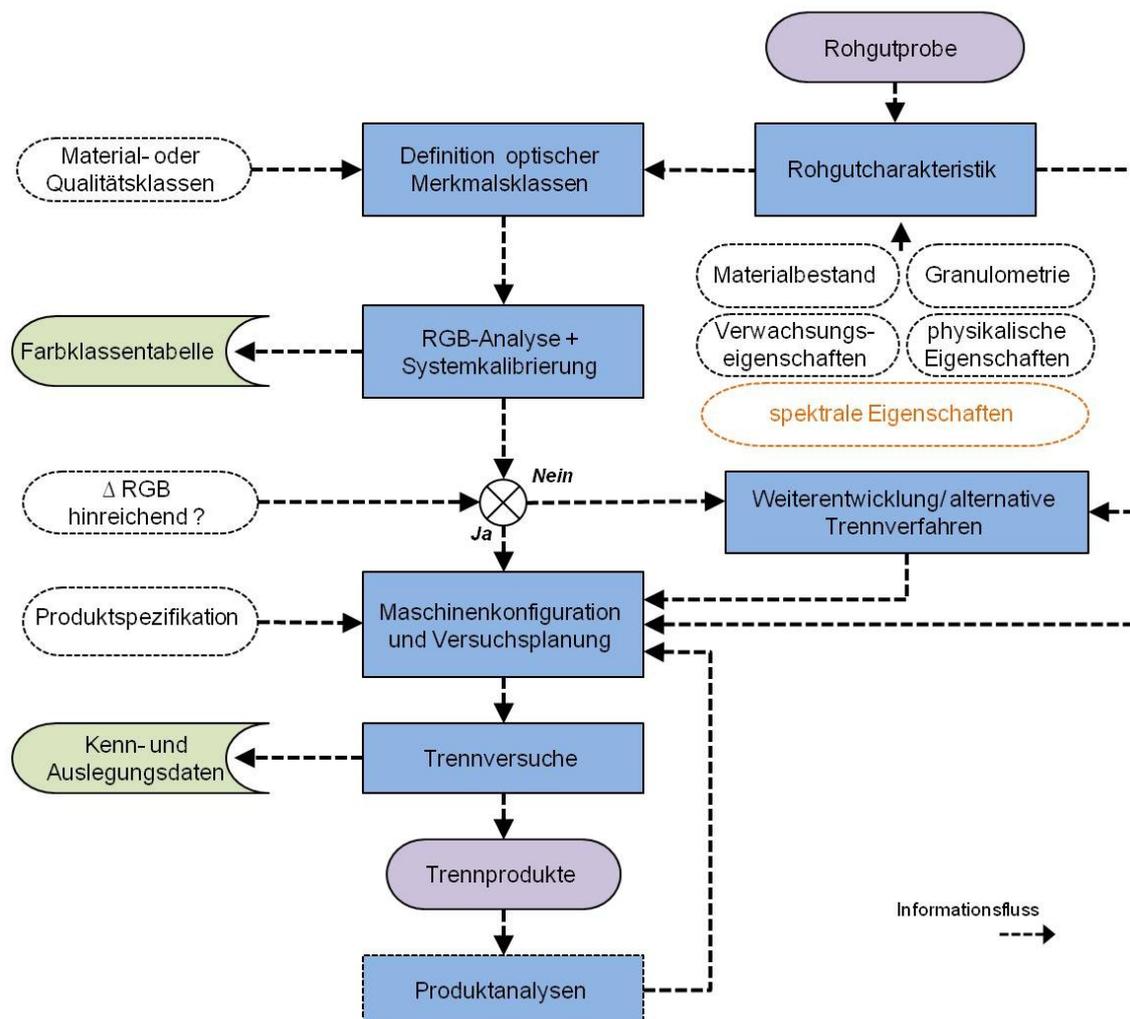


Abbildung 2: Weiterentwickelter Machbarkeitsprüfungs- und Konzeptionierungsprozess

Der dargestellte Prozess ermöglicht die effiziente Entwicklung abgesicherter großtechnischer Einsatzkonzepte und die Festlegung der Maschinenausrüstung, wobei Innovationspotentiale

systematisch und unmittelbar genutzt werden können. Dies trägt insbesondere den stark von der Lagerstätte abhängigen Rohguteigenschaften mineralischer Rohstoffe und variierenden Produktanforderungen Rechnung.

Die traditionelle Rohgutanalyse von mineralischen Rohstoffen beinhaltet in der Regel keine spektrale Eigenschaftsprüfung. In Zusammenarbeit mit den Forschungspartnern wurde die traditionelle Rohgutanalyse weiterentwickelt. In einer ersten Projektphase wurden dazu geeignete Analysegeräte, wie

- Lumineszenz-Spektrometer (LS 55 von Fa. Perkin Elmer),
- Reflexions- und Transmissions-Spektrometer (LAMBDA 950 von Fa. Perkin Elmer) und
- Spektrometer mit Lichtwellenleiter (Fa. Ozean Optics) angeschafft sowie

Methoden für eine systematische spektrale Analyse von Festkörperproben in Hinblick auf den Einsatz optischer Sortierer entwickelt.

Seit einiger Zeit wird nun die erweiterte Rohgutanalyse systematisch bei Binder + Co AG angewendet und ist nunmehr, wie in Abbildung 2 dargestellt, in den Validierungs- und Konzeptionierungsprozess integriert. Sie ist Basis für die Eignungsprüfung des Standardportfolios sowie der Weiterentwicklung der sensorgestützten Sortiertechnik der Binder+Co AG. Insbesondere werden dabei optische und spektrale Eigenschaften wie Reflexion, Transmission, Absorption und Lumineszenz mit Hilfe der Festkörperspektroskopie im Wellenlängenbereich zwischen 200 und 2.500 nm sowie die Sortierung beeinflussende Aspekte wie Wasseraufnahmefähigkeit und Transporteigenschaft systematisch analysiert. Die Ermittlung nutzbarer spezifischer spektraler Eigenschaften steht dabei im Fokus.

Bis dato wurden mehr als 100 Rohgutarten aus aller Welt derart analysiert und bearbeitet. Dazu ist eine Übersicht der analysierten überwiegend mineralischen Rohgutarten und Zwischenprodukte in Anhang E abgebildet. Die Fülle an generierten Spektren, Analyse- und Versuchsergebnissen führte zur Entwicklung einer zentralen Datenablage und Verwaltung mittels einer Datenbank. Diese firmeneigene Rohgut- bzw. Applikationsdatenbank unterstützt die Standardisierung der Datensätze und ein effizientes Wissensmanagement sowie eine systematische Nutzung von in der Vergangenheit gewonnenen Erkenntnissen bei der Lösungsentwicklung.

1.3.4 Spektrale Rohgutanalysen in Hinblick auf eine sortiertechnische Nutzung

Im Folgenden sind entwicklungsrelevante Ergebnisse von im Rahmen der Arbeit durchgeführten spektralen Rohgutanalysen sowie eine Bewertung der Klassifizierbarkeit von Mineralen und Glas zusammengefasst. Im Fokus standen dabei Rohgutproben, für welche die VIS-basierte Sortierung nur bedingt oder nicht eingesetzt werden kann.

1.3.4.1 NIR-basierte Klassifizierung von mineralischen Rohstoffen

Wie an Hand der Analyseergebnisse gezeigt werden konnte, weisen viele in den aufzubereitenden Rohgutarten enthaltene Mineralphasen verschiedene prinzipiell nutzbare Unterscheidungsmerkmale im NIR-Bereich von 780 bis 2.300 nm auf. Obwohl sehr reine Mineralphasen zumeist durch spezifische Absorptions- bzw. Reflexionseigenschaften - dem sogenannten *Fingerabdruck* - charakterisiert sind, beeinflussen

- mikrokristalline und regionale Verwachsungen,
- mikroskopische Variationen im Mineralbestand und
- elementare Einlagerungen

diese deutlich. Die Genese und Herkunft des Rohguts sind für die Eigenschaftsvariation wesentlich verantwortlich. Daher kann sich die Erfassung der rohgutsspezifischen Zusammenhänge von mineralogischen und NIR-spektralen Eigenschaften sowie die Nutzungsbewertung in Hinblick auf die sensorgestützte Sortierung als durchaus komplex darstellen. Dies insbesondere dann, wenn die merkmalsklassenspezifischen Spektren sich nur gering voneinander unterscheiden und/oder das Grundniveau der Reflexionsintensität gering ist. Häufig setzt sich die geringe Intensität von dunklen Partikeln im VIS-Bereich auch im NIR-Bereich fort. Die spektrale Dynamik ist in diesen Fällen gering und mineraltypische Signifikanzen sind kaum oder nicht erkennbar. Eine sichere Klassifikation von dunklen Objekten ist daher auf Grund eines zu geringen Signal-Rausch-Verhältnisses (SRV), insbesondere von industriellen Sensoren, oftmals nicht möglich.

Zudem verursacht an der Oberfläche und/oder in Poren sowie Hohlräumen lose gebundenes Wasser (H_2O) sehr ausgeprägte Absorptionsbanden und überlagert sich mit denen von kristallin-gebundenen Wassermolekülen bzw. Kristallwasser sowie OH^- -Gruppen. Sofern das Sortiergut in Folge der vorgeschalteten Aufbereitungsschritte oder der Lagerung oberflächlich nass ist, sollten die H_2O - und OH^- -Bandenbereiche nicht in die Auswertung eingezogen werden oder ist dies bei der Signalauswertung zu berücksichtigen.

Die aus den Material- und Spektralanalysen abgeleiteten Erkenntnisse und vor allem die beschränkte örtliche Abbildungsauflösung der verfügbaren industriellen NIR-Sensoren begründen die aktuell noch limitierten Einsatzmöglichkeiten in der mineralischen Rohstoffaufbereitung.

1.3.4.2 UV- oder NIR-basierte Klassifizierung von Altglas

Im Gegensatz zu mineralischem Rohgut ist die stoffliche und spektrale Varianz von Glasscherben deutlich eingeschränkter und definierter. Dies gilt, wie die Analysen zeigen, auch für das Absorptionsverhalten im UV- und NIR-Bereich. Glasarten lassen sich unter Berücksichtigung der Färbung mittels UV-Absorptionskante und glasfremde Störstoffe wie Porzellanscherben über das Transmissionsverhalten im NIR-Bereich klassifizieren und sortieren.

Aus den durchgeführten spektralen Analysen ist grundsätzlich eine glasart-spezifische isolierte Lage der sogenannten „UV-Absorptionskanten“ ableitbar. Der Lageabstand ist insbesondere zwischen unbuntem und transparentem Kalknatron-Silikatglas, Glaskeramik, Boro-Silikatglas und Quarz signifikant. Der spektrale Verlauf und die Lage der UV-Absorptionskante werden allerdings durch die Färbung beeinflusst.

Ausgehend von den wesentlichen farblichen Ausprägungen glaskeramischer Scherben bzw. Produkte wurden spezielle Farbklassen (unbunt-transparent, rauch, honig braun, etc.) definiert und alle Musterspektren entsprechend der Farbklassenzuordnung ausgewertet. Über alle ausgewerteten Farbklassen betrachtet, überlappen sich die UV-Absorptionskantenbereiche von Glaskeramik mit Kalknatron-Silikatglas nicht. Bezogen auf die Farbklassen sind die Abstände der Bereichsmittelwerte durchgehend groß und liegen zwischen 45 und 65 nm. Eine mit der Färbung gekoppelte eindeutige Klassifizierung mittels UV-Absorptionskanten von Kalknatron-Silikatglasscherben und produktionskritischen Glaskeramikscherben oder auch Quarzglasscherben ist daher gegeben.

Im Gegensatz dazu ist diese Klassifizierungsmethode - in Hinblick auf eine sortiertechnische Nutzung - für eine Differenzierung zwischen Kalknatron-Silikatglas und Blei-Silikatglas nicht sowie für Boro-Silikatglas eingeschränkt geeignet.

Der Einfluss der Scherbendicke auf die UV-Absorptionskante kann für die Masse der Glasscherben vernachlässigt oder gegebenenfalls in Abhängigkeit der Partikelgröße kompensiert werden. Bei gefärbten und sehr dicken bzw. kubischen Glasobjekten wie

Flaschenbodenbruchstücken kann aber in Folge der geometrisch bedingten starken Transmissionsreduktion die UV-Absorptionskantenbestimmung schwierig sein.

Da die Scherbentemperatur bei der Sortierung prozessbedingt in einem Bereich von +5 bis +40 °C liegt, ist der Temperatureinfluss auf das Transmissionsverhalten ebenfalls sehr gering und damit vernachlässigbar.

Wie aus der Praxis bekannt ist und im Rahmen der Forschungsarbeiten verifiziert wurde, besteht eine optische Abgrenzungsproblematik zwischen intensiv gefärbten, wenig transparenten Glasscherben und KSP-Objekten. Insbesondere dünne weiße Porzellanscherben können nicht trennscharf VIS-basiert aussortiert werden.

Dünne, weiße Porzellanscherben weisen im VIS-Bereich vergleichsweise hohe Transmissionswerte auf, welche sogar durchgehend über den von intensiv gefärbten Glasscherben liegen und auf sehr konstantem Niveau auch im NIR-Bereich verlaufen. Im Unterschied dazu steigt bei den analysierten Glasproben die Transmission im NIR-Bereich kontinuierlich und ab etwa 1.500 nm über das Niveau der Porzellanscherben an. Dies trifft auch auf Glasscherben mit anhaftenden Papieretiketten zu. Insbesondere trockenes Papier ist im NIR-Bereich sehr transparent und beeinflusst das Transmissionsverhalten vergleichsweise wenig.

Ähnlich wie für die VIS-basierte Sortierung stellen eine entsprechende Vorbehandlung und Konditionierung wie beispielsweise Scherbenreinigung, Klassierung oder Trocknung wesentliche Voraussetzungen für die Einsatztauglichkeit und eine hohe Effizienz dar.

1.3.4.3 Lumineszenz-basierte Klassifizierung

Es wurde eine Vielzahl an Rohgutproben bzw. Merkmalsklassen bezüglich ihrer Lumineszenzeigenschaften untersucht. Von etwa 100 analysierten, überwiegend mineralischen Rohgut- und Zwischenproduktproben aus aller Welt weisen etwa 15 % nutzbare Lumineszenzeigenschaften auf. Aus den Ergebnissen lässt sich die starke Abhängigkeit von der Lagerstättengenese auf diese bestätigen. Neben den fehlenden grundlegenden elementaren Strukturvoraussetzungen verhindern oftmals eingelagerte sogenannte „Quencher“ wie Fe-Ionen Lumineszenzerscheinungen.

Sofern Lumineszenzeigenschaften gegeben waren, wurden als wesentliche Klassifizierungsparameter die Anregungs- und Emissionswellenlängenbereiche identifiziert.

In Tabelle 1 sind dazu beispielhaft Anregungs- und Emissionskennwerte untersuchter Proben dargestellt.

| Probe | λ_{A1max} | $\Delta\lambda_{A1max/2}$ | λ_{A2max} | $\Delta\lambda_{A1max/2}$ | λ_{E1max} | $\Delta\lambda_{E1max/2}$ | λ_{E2max} | $\Delta\lambda_{E2max/2}$ |
|--------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| Blei-Silikat | 270 | 100 | - | - | 390 | 110 | - | - |
| Rubin | 405 | 75 | 560 | 105 | 693 | 10 | | |
| Calcit | 305 | 40 | - | - | 625 | 90 | - | - |
| Kalkstein | 350 | 70 | | | 520 | 155 | | |
| Chalzedon | 250 | 65 | | | 500,520 | 75 | | |
| Scheelit | 270 | 50 | | | 425 | 160 | | |
| Fluorit | 325 | 25 | - | - | 420 | 60 | - | - |

Tabelle 1: Beispielhafte Zusammenstellung von Anregungs- und Emissionskennwerten untersuchter Proben - abgeleitet aus den 3D-Intensitätsaufnahmen

Es konnte zudem am Beispiel von Bleiglas und Kalkstein gezeigt werden, dass die Emissionsintensität, welche in direktem Zusammenhang mit der Quantenausbeute steht, zur qualitativen Gehaltsbestimmung von Elementen bzw. Verbindungen, welche die Lumineszenz verursachen, herangezogen werden kann.

Auf Grund der Anforderungen beim Einsatz der sensorgestützten Einzelkornsorrierung und technischer Restriktionen wie hoher Objektrate, hoher erforderlicher örtlicher Abbildungsauflösung und beschränkter Detektorempfindlichkeit sowie Reaktionszeit ist die Lumineszenzlebensdauer als Klassifizierungsmerkmal aktuell nicht nutzbar.

In Bezug auf die Altglassortierung ergibt sich, dass die Lumineszenzeigenschaft von Blei-Silikatglas auf Grund der spezifischen spektralen Charakteristik sehr gut geeignet ist zur Differenzierung gegenüber nicht bleihaltigem Kalknatron-Silikatglas. Blei-Silikatglas weist zudem eine vergleichsweise hohe Quantenausbeute QE von ca. 16 % auf, welche eine Aktivierung der Lumineszenz bereits ab sehr geringen PbO-Gehalten ermöglicht.

Sofern mineralisches Rohgut bzw. die darin enthaltenen Mineralphasen spezifische Lumineszenzeigenschaften besitzen, haben die Untersuchungen ergeben, dass die lumineszenz-basierte Klassifizierung, insbesondere für die Erkennung von verwachsenen bzw. nicht vollständig aufgeschlossenen Körnern und sehr feinkörnige Fraktionen, gut geeignet ist. Eine entsprechend hohe örtliche Auflösung der Sensorik und Empfindlichkeit ist dafür erforderlich. Da die Quantenausbeute zumeist nur wenige Prozent beträgt, muss die Bestrahlungsstärke sehr hoch sein.

1.3.5 Neuentwickelte Sensoriken

Aus den spektralen Analyseergebnissen und unter Berücksichtigung der verfügbaren Detektoren wurde ein grundlegender Lösungsansatz basierend auf einer „Sensorfusion“ gewählt und spezifische Serienvarianten entwickelt. Eine vereinfachte Konzeptskizze, der zu Grunde liegenden Datenverarbeitungsstruktur mit zwei Bilddatensensoriken, ist dazu in Abbildung 3 dargestellt.

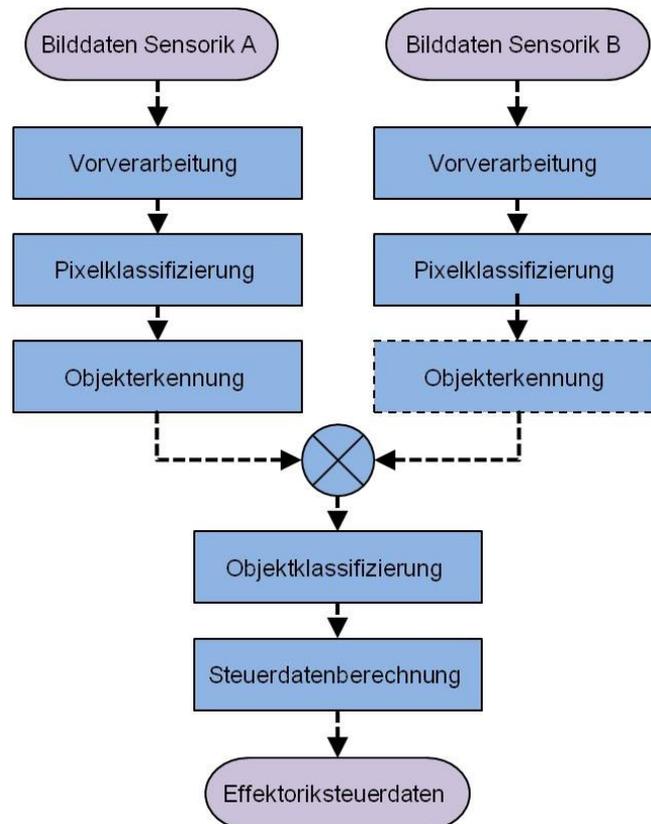


Abbildung 3: Konzept und Datenverarbeitungsstruktur der Sensorfusion

Dieses Konzept ermöglicht nicht nur das gleichzeitige Detektieren der verschiedenen spektralen Eigenschaften mit einer Sensorkombination, sondern auch eine komplexe und/oder hierarchische Verknüpfung bei der Klassifikation und Objektbewertung. Daraus ergeben sich beispielsweise robustere und exaktere Objektbewertungen und neue sowie kombinierte Klassifizierungsmöglichkeiten. Die Sensorfusion führt zu einem Informationsmehrwert, der unter anderem die Lösung komplexer Sortieraufgaben mit nur einem Sortierschritt in einem Prozessor ermöglicht. Herzstück der Technik ist, neben einer anwendungsspezifischen Sensor-/Beleuchtungskombination, vor allem eine neuentwickelte Multiprozessorarchitektur mit paralleler Datenverarbeitung und Auslastungsmanagement. Damit können die anfallenden hohen Datenraten auch mit rechenleistungsintensiven Algorithmen in quasi Echtzeit verarbeitet und multi-core Rechner effizient genutzt werden.

Folgende Varianten wurden umgesetzt oder sind in der industriellen Umsetzung:

- VIS-Transmission in Kombination mit UV-Transmission zur Differenzierung zwischen Glaskeramik und Kalknatron-Silikatglas
- VIS-Transmission in Kombination mit Lumineszenz zur Differenzierung zwischen Blei-Silikatglas und Kalknatron-Silikatglas
- NIR-Transmission in Kombination mit Lumineszenz zur Sortierung von Mineralphasen

In Abbildung 4 ist beispielhaft das Systemschema mit NIR-Transmission in Kombination mit frontangeregter Lumineszenz zur Sortierung von nichttransparenten Mineralphasen.

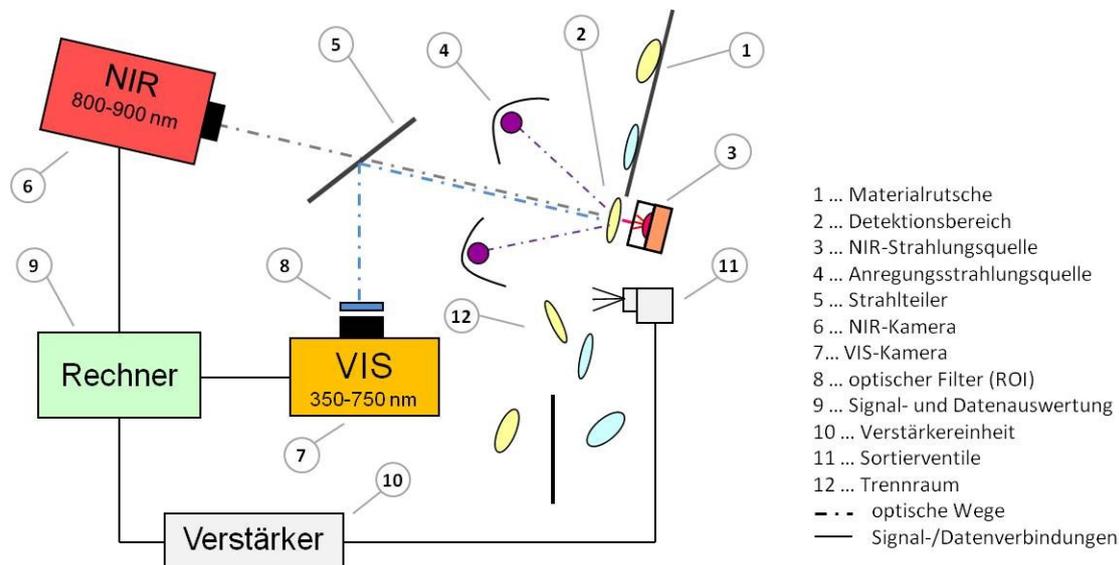


Abbildung 4: Systemschema der NIR/Lumineszenz-Sensorik mit Frontanregung für die Sortierung von mineralischen Rohstoffen

Der mechanische Aufbau ist bei allen drei Varianten nahezu ident. Lediglich die Beleuchtungskomponenten und passiven optischen Bauteile werden in Hinblick auf den Spektralbereich, die Bestrahlungsintensität und Empfindlichkeit auf die spezifischen Aufgabenstellungen abgestimmt. Durch Einsatz örtlich hochauflösender Kameratechnik können Körnungen bis 1,5 mm sortiert und Verwachsungen in gleicher Größenordnung detektiert werden. Alle drei Varianten konnten elektrisch und maschinenbaulich direkt in die bestehende Produktlinie der Binder+Co AG integriert werden. Die Integration in die Produktlinien CLARITY® und MINEXX® erfolgte schrittweise über mehrere Jahre.

In Zusammenhang mit den oben angeführten Varianten wurden mehrere Schutzrechte angemeldet und bereits zwei Patente erteilt.

1.3.6 Einsatzerfahrungen mit Sensorfusionssensorik

Mehrere Versuchsreihen mit sensorfusions-basierten Sortierern und Funktionsmustern wie auch mit unterschiedlichen Rohgütpollen wurden überwiegend im Technikum der Binder+Co AG durchgeführt und teilweise durch Anlagenversuche sowie Einsatzerfahrungen ergänzt.

In einem ersten Fallbeispiel wurde die Aussortierung von Glaskeramikscherben aus einer Altglasfraktion mittels geeignetem sensorfusions-basierten Sortierer behandelt. Simuliert wurde dabei eine Anlagennachrüstung. Die Versuchsergebnisse und –auswertungen ergeben für die beiden getrennt sortierten Partikelbereiche 6/12 mm und 12/50 mm Inhaltsausbringenswerte von 92,78 % und 96,84 %. Berücksichtigt man die sehr geringen Übersortierungswerte von 0,84 % und 0,51 % der Wertstoffklasse, so lassen sich sehr hohe Trennungsgrade von ca. 92 % und 96 % für beide Partikelbereiche errechnen. In Folge der positiven Versuchsergebnisse und des vorgeschlagenen einfachen Lösungskonzepts wurde die Anlagennachrüstung realisiert. Versuchsreihen mit einer weiterentwickelten, örtlich hochauflösenden UV/VIS-Transmissionssensorik ergaben für 3 mm große Glaskeramikpartikel einen Trenngrad von 83,1 %. Mit dieser Variantenentwicklung konnte eine aufbereitungstechnische Lücke geschlossen werden, da insbesondere Glaskeramikpartikel größer 3 mm schmelztechnisch problematisch sind.

In einem zweiten Fallbeispiel wurde die Aussortierung von Bleiglasscherben aus einer Altglasfraktion mittels geeignetem sensorfusions-basierten Sortierer behandelt. Simuliert wurde dabei ebenfalls eine Anlagennachrüstung. Die Versuchsauswertungen ergaben bezüglich Bleiglasscherben mit einem PbO-Gehalt über 0,5 % für die beiden getrennt sortierten Kornbereiche 8/12 mm und 12/50 mm Inhaltsausbringenswerte von 94,74 % und 99,09 %. Berücksichtigt man die sehr geringen Übersortierungswerte von 0,2 % und 0,44 % der Wertstoffklasse, so ergeben sich noch höhere Trennungsgrade von ca. 94,5 % und 98,6 % als im Fallbeispiel bezüglich der Aussortierung von Glaskeramik. Diese hohen Trennungsgrade unterstreichen die gute Selektivität der Lumineszenzeigenschaft und gelungene technische Nutzung. In Bezug auf die Bleikonzentration konnte der durch Bleiglas verursachte PbO-Gehalt von 461 ppm im Aufgabegut auf 5 ppm im Produkt reduziert werden. Dies ergibt für den gesamten betrachteten Partikelbereich - unter Berücksichtigung des stöchiometrischen Zusammenhangs - einen rechnerischen Bleigehalt von nur 4,6 ppm

im Produkt und ein sehr hohes Blei-Inhaltsausbringen $r_{\text{Pb,AW}}$ von 98,8 %. Die Größenordnung der analysierten Bleigehaltsreduktion und ein stabiles niedriges Bleigehaltsniveau wurden durch kontinuierliche Qualitätsanalysen des Anlagenbetreibers bestätigt. Diese spezifische sensorfusions-basierte Sortiertechnik ist mittlerweile bereits dutzendfach in der Altglasaufbereitung im Partikelbereich 3/50 mm erfolgreich im Einsatz.

In einem weiteren Fallbeispiel wurde die Aussortierung von Flussspat aus einem Schwerspat-Vorkonzentrat mittels geeignetem sensorfusions-basierten Sortierer behandelt. Simuliert wurde dabei ebenfalls eine Anlagennachrüstung. Die Versuchsauswertung ergab für die Reinmineralklasse ein Inhaltsausbringen von 94 und 97 % für die sortierten Kornbereiche 5/8 mm und 12/20 mm. Entsprechend hoch sind auch die Trennungsgrade von etwa 90 % und höher für diese Merkmalsklassen. Auch das Inhaltsausbringen der Verwachsungsklassen zwischen ca. 82 und ca. 92 % ist gut und unterstreicht das Differenzierungsvermögen der Sortiertechnik in Bezug auf Verwachsungen. Eine gewisse Unschärfe ist dabei allerdings der einseitigen zweidimensionalen Abbildung der dreidimensionalen Verwachsungsverhältnisse geschuldet. Eine Verbesserungsoption stellt hier sicher eine zweiseitige Detektion mit verknüpfter Auswertung dar. Das Inhaltsausbringen von Flussspat ist mit ca. 78 und 79 % in beiden Kornfraktionen gut. Allerdings ist der Gehalt an Schwerspat mit über 50 % im erzeugten Flussspat-Vorkonzentrat deutlich über dem betrieblich festgelegten Zielwert von 15 %. Obwohl in Bezug auf die definierten Reinmineral- und Verwachsungsklassen eine hohe Sortiereffizienz nachgewiesen wurde, konnte für diesen Anwendungsfall kein verfahrenstechnischer bzw. wirtschaftlicher Vorteil durch den Einsatz der sensorgestützten Sortierung dargestellt werden.

Im letzten Fallbeispiel wurde die Aussortierung von Rohrubinen und Koruden aus einem Vorkonzentrat, welches im Wesentlichen aus Quarzkies bestand, mittels geeignetem sensorfusions-basierten Sortierer behandelt. Simuliert wurde dabei ein neu zu errichtender, mehrstufiger Sortierprozess mit separater Aufbereitung der Kornbereiche 1,6/3,15 mm, 3,15/6,3 mm und 6,3/20 mm. Die Versuchsauswertungen ergaben für die erste Gewinnungsstufe sehr gute Trennungsgrade von 93,6 %, 98 % und 99,65 %. Basierend auf den Versuchsergebnissen wurden mittels rechnergestützter Simulation für das vorgeschlagene Verfahren Inhaltsausbringenswerte von 99,8 % in der Körnung 6,3/20 mm und von 99,2 % in der Körnung 1,6/6,3 mm ermittelt. Die Wertmineralgehalte der Konzentrate sollten bei ca. 12 und 44,5 % liegen und die diesbezügliche Zielsetzung erfüllen. Der signifikante optische Eigenschaftsunterschied, der sehr gute Aufschluss über alle Kornfraktionen und die Leistungsfähigkeit der neuentwickelten lumineszenz-basierten

Sortiertechnik führen zu diesem exzellenten Ergebnis. Auf Basis der Durchführung sowie Auswertung der experimentellen Versuchsreihen im Technikum sowie der rechnergestützten Simulation konnte das vorgeschlagene Sortierverfahren hinsichtlich geforderter Durchsatzraten und Sortiereffizienz verfahrenstechnisch, insbesondere auch für die Körnung 1,6/6,3 mm, dargestellt werden. Für dieses Aufgabegut und diese Aufgabestellung ist die lumineszenz-basierte Sortierung sehr gut geeignet.

1.4 Abschlussbetrachtung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojekts und in den Teilprojekten konnten wertvolle Erkenntnisse für die Entwicklung und den erweiterten Einsatz sensorgestützter Sortierung gewonnen werden. Insbesondere die vorgestellten technischen Entwicklungen und Praxisbeispiele geben einen Einblick in vorteilhafte Einsatzmöglichkeiten moderner sensorgestützter Sortiertechnik unter Nutzung unterschiedlicher spektraler Eigenschaften über den sichtbaren Wellenlängenbereich hinaus. Die bei Binder+Co AG seit einiger Zeit systematisch durchgeführte spektrale Rohgutanalyse unterstützt die zielgerichtete Sensor- und Komponentenentwicklung. Die zudem enge Kopplung der Produktentwicklung mit der aufbereitungstechnischen Lösungsfindung ermöglicht eine unmittelbare Nutzung der darauf basierenden neuartigen Sortiertechniken in der Aufbereitung von primären und sekundären Rohstoffen. Dieses Konzept unterstützt eine synergetische Nutzung von technischen Entwicklungen bei der Binder+Co AG und wird auch zukünftig zu einem erweiterten und vermehrten Einsatz der sensorgestützten Sortierung in den genannten Bereichen beitragen.

2 Einleitung

Der Bedarf an mineralischen Rohstoffen ist weltweit stark im Steigen begriffen (1) und eine Änderung dieses Trends ist nicht abzusehen. Die begrenzten bekannten Reserven in der Geosphäre und deren Lage ergeben vor allem für den EU-Raum ein gewisses Versorgungsrisiko. Im Auftrag der Europäischen Kommission wurden dazu 54 mineralische und metallische Rohstoffe einer Risikobewertung unterzogen und davon 20 als versorgungskritisch eingestuft (3).

Die Exploration, Erschließung und Sicherung neuer primärer Rohstoffquellen wurde in den letzten Jahren weltweit intensiviert. Dabei stehen vor allem die öffentlich viel diskutierten und als sehr versorgungskritisch eingestuften Seltenen Erden im Fokus (4), ist aber darauf keinesfalls beschränkt. Die etablierten Industrienationen wie die USA oder Deutschland stehen dabei im Wettbewerb mit aufstrebenden Regionen oder Ländern wie China.

Neben umweltrelevanten Aspekten werden zudem Sekundärrohstoffe und eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft als Alternative zur Sicherung der Rohstoffversorgung immer interessanter und wichtiger. Dies gilt wiederum insbesondere für den EU-Raum und findet in der EU-Abfallrahmenrichtlinie seinen Niederschlag. Darin wird hochwertiges Recycling und die Nutzung von Abfällen als Rohstoffquelle bei der Entwicklung hin zu einer „Recycling-Gesellschaft“ als wesentlich definiert (5).

Begleitend zur Suche und Erschließung von neuen Rohstoffquellen steigt der Druck, die zum Einsatz gelangenden Aufbereitungsprozesse und -technologien für primäre und sekundäre Rohstoffe zu optimieren und deren Effizienz zu erhöhen. Dadurch ist es unter anderem auch möglich schlechtere Rohgutqualitäten (ROM), Deponieprodukte und sekundäre Rohstoffe ökonomisch aufzubereiten und hochwertige Produkte für die weiterverarbeitende Industrie herzustellen. So können aus bekannten und neuen Rohstoffquellen bzw. Ressourcen auch zusätzlich nutzbare Reserven für Industrie und Gesellschaft bereitgestellt und deren Reichweite insgesamt erstreckt werden (6).

2.1 Forschungsansatz

Wesentlich für eine effiziente Aufbereitung und Veredelung sind dabei die zur Verfügung stehenden Trenn- und Sortiertechniken für Schüttgüter. Traditionelle Verfahren alleine stoßen dabei mehr und mehr an ihre technischen und ökonomischen Grenzen.

Im Unterschied zu traditionellen Sortiertechniken (Dichtesortierung, Magnetscheidung, Elektroscheidung, Flotation, etc.) ist bei der sensorgestützten Sortierung das Sortierkriterium von der trennenden Kraft (Ablenkkraft, Sink- bzw. Auftriebskraft, Haltekraft, etc.) entkoppelt (7). Die sensorgestützte Sortierung stellt dadurch eine interessante trenntechnische Alternative dar und eröffnet vielfältige Konfigurationsvarianten sowie Einsatzmöglichkeiten.

Die einfache optische bzw. VIS-basierte und auch die nahinfrarot-basierte Sortierung haben als Teilgebiete der sensorgestützten Sortierung insbesondere die Aufbereitung sekundärer Rohstoffe in den letzten zwei Dekaden revolutioniert. Selten hat die Einführung einer neuen Technik in so kurzer Zeit zu einer so kompletten Neuorientierung in der Verfahrenstechnik geführt wie in diesem Fall. Höhere Qualitätsanforderungen der weiterverarbeitenden Industrie einerseits und neue Störstoffe in den Konsum- und Industrieabfällen andererseits, führen aber laufend zu neuen spezifischen Trennaufgaben. Als Beispiel dazu seien Glaskeramik oder Bleiglas angeführt, welche sich in den letzten Jahren zu einem wesentlichen Problem im Altglasrecycling entwickelt haben (8) (9) und auch in Qualitätsstandards (10) aufgenommen wurden.

Im Gegensatz dazu ist der Einsatz sensorgestützter Sortierer in der Aufbereitung primärer Rohstoffe wie Industrieminerale, Salze und Erze noch vergleichsweise unbedeutend. Der Innovationsdruck war in diesem sehr traditionellen Bereich viel weniger ausgeprägt, da die bekannten und bewährten Verfahren bei einer Vielzahl der Aufgabenstellungen zufriedenstellende Ergebnisse lieferten (7). Zudem sind die verfügbaren, aber vorwiegend für die Recyclingindustrie oder Lebensmittelindustrie entwickelten, sensorgestützten Sortiersysteme nur beschränkt in der Aufbereitung primärer Rohstoffe einsetzbar. Aufgrund der seit einigen Jahren verstärkten Forschungs- und Entwicklungstätigkeit ist aber auch in diesem Bereich zukünftig von einem vermehrten Einsatz der sensorgestützten Sortierung auszugehen.

Insbesondere für die Aufbereitung von primären Rohstoffen stellt die Entwicklung von leistungsfähigen und spezifisch angepassten sensorgestützten Sortiersystemen eine große Chance dar. Durch intelligente Integration neuer Sensortechnik in Sortiersysteme und Abstimmung der Verfahrenstechnik können wie gefordert die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Aufbereitungsprozesse optimiert werden (11), (12).

2.2 Aufgabenstellung

Diese Arbeit verfolgt einen neuen sensortechnischen Ansatz unter Einbeziehung eines erweiterten Wellenlängenbereiches von 200 nm – 2.500 nm, der dort zur Anwendung kommen kann, wo optische VIS-basierte Sortiertechnik, welche im visuellen Wellenlängenbereich von 400 nm – 780 nm arbeitet, beschränkt funktioniert. Diese neuartige Technik soll somit im Sinne der Einleitung einen Beitrag zur effizienteren Aufbereitung von primären und sekundären Rohstoffen leisten und das Einsatzpotential der sensorgestützten Sortierung erweitern.

Die wesentlichen Arbeitspakete sind dazu:

- Die Durchführung und Analyse von applikationsspezifischen Versuchsreihen mit klassischer VIS-basierter Sortiertechnik zur **Bewertung der Einsatzgrenzen**.
- Die **Einwicklung und Durchführung einer erweiterten Rohgutanalyse**, welche relevante Eigenschaften in Hinblick auf den Einsatz von sensorgestützter Sortiertechnik in einem erweiterten optischen Wellenlängenbereich von 200 bis 2.500 nm umfasst und als Basis für die Entwicklung neuer Sortiertechniken dient. Dazu sollen spezifische Kenndaten definiert und Messmethoden entwickelt sowie ein firmeneigenes Wissensmanagementsystem entwickelt werden.
- Die **Entwicklung einer alternativen industrietauglichen Sensortechnik** zur Einzelkornsortierung unter Nutzung des UV-Wellenlängenbereiches, die eine einfache **rohgutspezifische Konfiguration** berücksichtigt.
- Die **Evaluierung der Sortiereffizienz durch Technikums- und Industrieversuche** im Bereich der primären und sekundären Rohstoffaufbereitung sowie die Diskussion des Anwendungspotentials und Ableitung von Regeln für die Prozessintegration, Konditionierung und Systemausrüstung.

2.3 Innovationsstrategie

Die Komplexität der Aufgabenstellung erforderte eine interdisziplinäre Kopplung der Fachbereiche „Festkörperspektroskopie“ und „Aufbereitungstechnik“. Für die eigentliche Sensorikentwicklung sind hingegen Disziplinen wie „Sensorikdesign“, „Bildverarbeitung“, „Automatisierungstechnik“ und „Maschinenbau“ wesentlich. Die Prozessintegration und Evaluierung von Einsatzergebnissen und –möglichkeiten erfordert wiederum Know-how aus dem Bereich der „Aufbereitungs- und Verfahrenstechnik“.

Ein von der Binder+Co AG initiierte und geführte Forschungskoooperation trägt dem Rechnung und widmete sich in einem mehrjährigen Projekt der Aufgabe materialspezifische optische Effekte und neue Techniken, insbesondere für die sensorgestützte Sortierung von Altglas und Industriemineralen, zu erforschen und zu entwickeln. Auf Basis der „open innovation“ bringen die in unterschiedlichen Bereichen tätigen Forschungspartner ihr Fachwissen aus den jeweiligen Disziplinen in das Projekt mit ein. Kooperationspartner sind unter anderem der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben, das Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der TU Graz, das IOSB Fraunhofer in Karlsruhe, spezialisierte Technologielieferanten und Aufbereitungsunternehmen aus unterschiedlichen Industrien.

Aufbauend auf die systematischen Grundlagenforschungen zu materialspezifischen optischen Effekten und Rohgutanalysen wurde ein neuer genereller Lösungsansatz *„kombinierte Anregung und Detektion mehrerer klassifizierungsrelevanter optischer Effekte über einen erweiterten Wellenlängenbereich“* definiert.

In mehreren Teilprojekten zu konkreten Sortieraufgabenstellungen wurden sodann die Sensortechniken und Komponenten entwickelt sowie in Sortiermaschinen integriert. Gegebenenfalls wurden die Grundlagendaten auf spezielle Fragestellungen hin ergänzt. Die Kooperationspartner wurden entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung in die einzelnen Projektphasen eingebunden. Die wesentlichen Phasen für die jeweiligen Technik- bzw. Produktentwicklungen sind ähnlich und gliedern sich grob wie folgt:

- Grundlagenstudie
- Definition der technischen Kenndaten und Zielsetzungen
- Entwicklung von einzelnen Sensorkomponenten
- Funktionsmuster
- Industrieprototyp
- Evaluierung des Einsatz- und Prozessnutzen
- Serienüberleitung

Die Inhalte und der Umfang der einzelnen Arbeitspakete innerhalb der Phasen variierten doch deutlich. Zur Fortschrittsbewertung und Risikominimierung wurden entsprechend den Prozessvorgaben der Binder+Co AG Meilensteinreviews zwischen den Projektphasen durchgeführt. Die Projektdauer betrug zwischen ein und zwei Jahre.

3 Historischer Rückblick und Trends

Die seit Jahrtausenden praktizierte Handklaubung bzw. manuelle Sortierung von Schüttgut auf Basis visueller Eindrücke kann wohl als Vorbild, der erst seit etwa siebzig Jahren eingesetzten sensorgestützten und insbesondere der optischen Sortierung, angesehen werden (11).

Die manuelle Sortierung erfolgt in der ursprünglichen und einfachsten Form direkt am Haufwerk. Üblicherweise wird jedoch das Schüttgut auf sogenannten Sortierbändern am Sortierpersonal kontinuierlich vorbeigefördert. Der Mensch nutzt bei der manuellen Sortierung vorwiegend visuelle Sinneseindrücke und leitet daraus spezifische Eigenschaften wie Oberflächenfarbe, Objektgeometrie und Oberflächenstruktur ab. Diese individuellen Objekteigenschaften werden mit angelernten und im Gehirn gespeicherten Merkmalsklasseneigenschaften verglichen. Es werden über einen meist sehr einfachen Entscheidungsalgorithmus die visuell erfassten Eigenschaften kombiniert und das betrachtete Objekt einer Merkmalsklasse bzw. Qualitätsklasse zugeordnet. Im einfachsten Fall sind zwei Qualitätsklassen wie „Gut“ und „Schlecht“ definiert. Entsprechend der logistischen Bedingungen erfolgt danach von Hand der Transport und die Ablage des klassifizierten Objektes.

Bis heute wird die manuelle Klaubung vor allem zur Bergevorabscheidung bei der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen wie beispielsweise Magnesit, Talk oder Colemanit und bei der Sortierung von großteiligen Abfällen wie etwa Altkunststoff, Altpapier oder Aluminiumschrott eingesetzt. Abbildung 5 zeigt beispielsweise die Handklaubung von grobkörnigem Magnesitbruch wie sie auch heutzutage noch in der Türkei üblich ist. Durch den permanenten Rationalisierungsdruck wurde und wird dieser personalintensive Prozessschritt auch in Schwellenländern durch vielfältige klassische Trennverfahren und immer mehr durch sensorgestützte Sortierung ersetzt (13).

Die ersten sensorgestützten Sortierer wurden bereits vor über siebzig Jahren für die Aufbereitung spezieller mineralischer Rohstoffe eingesetzt. Neben optischen wurden vor allem induktive und radiometrische Sensoren verwendet. Über lange Zeit war der Einsatz von sensorgestützten Sortierern vor allem aus wirtschaftlichen Gründen auf die Aufbereitung und Konzentration von hochwertigen Rohstoffen, wie z.B. Diamanten und Uranerz eingeschränkt (11), (14).



Abbildung 5: Handklaubung von Magnesitbruch in der Türkei im Jahr 2012

Die traditionelle Kultur im Bergbau und den unmittelbar angelagerten Industrien hat bis vor kurzem einen nennenswerten Einsatz in diesem Bereich gehemmt. Seit Beginn dieses Jahrtausends steigen aber auch im Bereich der Industriemineralen- und Erzaufbereitung die Installationszahlen vor allem von optischen Sortierern. Der Autor schätzt auf Basis von Referenzlisten (13) und seiner langjährigen Marktkenntnis die Einsatzzahl in diesem Bereich trotz der positiven Entwicklung erst auf einige hundert bis tausend Stück.

Etwa zeitgleich wurde auch begonnen sensorgestützte Sortierung in der Lebensmittelverarbeitungsindustrie einzusetzen und diese hat sich in diesem Bereich zu einer wichtigen Prozesstechnik entwickelt. Entsprechend hoch ist die Einsatzzahl insbesondere von optischen Sortierern unterschiedlichster Ausprägung. So gibt die Fa. Bühler als ein führendes Unternehmen in diesem Bereich an, seit 1947 25.000 Stück installiert zu haben (15).

Vor etwa dreißig Jahren führte dann das aufkommende Rohstoffrecycling zu neuen Anforderungen an die Aufbereitungstechnik und ersten Versuchen mit Altglas. Im sich zügig entwickelnden Recyclingbereich konnte sich die sensorgestützte Sortierung rasch zu einer Schlüsseltechnologie für die Aufbereitung verschiedenster sekundärer Rohstoffe wie Altglas, Altpapier, Kunststoffe, Baureststoffe oder Altmetalle entwickeln. Überwiegend kommen dabei VIS-basierte, NIR-basierte und induktive Sensoren zum Einsatz. Zwei Gründe erscheinen wesentlich für diese Entwicklung. Einerseits die rasanten technologischen Entwicklungen in der Automatisierungs-, Computer- und Sensortechnik seit Beginn der neunziger Jahre des

letzten Jahrhunderts und andererseits die Aufgeschlossenheit der Recyclingbranche gegenüber neuen Technologien (11). Alleine in der Altglasaufbereitung sind mehrere tausend und über alle Recyclingteilbereiche zusammengerechnet sind wohl über 10 000 Maschinen im Feld installiert.

Neben der immerwährenden Suche nach Einsatzmöglichkeiten in Bezug auf neue Materialfraktionen und dem Versuch neue Sensortechniken zu nutzen, kann die Feinfraktionssortierung < 8 mm als ein genereller Trend und eine wesentliche Aufgabenstellung für die Maschinenentwicklung in den letzten Jahren genannt werden. Die dadurch getriebene Technologieentwicklung eröffnet vor allem auch bessere Möglichkeiten für den Einsatz in der Industriemineral- und Erzaufbereitung. Im Vergleich zu Sekundärrohstoffen sind die Verwachsungseigenschaften zumeist komplexer und eine hochwertige Aufbereitung erfordert einen entsprechenden Aufschluss. Insbesondere mit VIS-basierten Sortierern können die dabei erzeugten feinkörnigen Fraktionen immer effizienter getrennt bzw. sortiert werden.

4 Sensorische Grundlagen

4.1 Überblick

Zur Detektion von merkmalsklassenrelevanten Eigenschaften steht heutzutage eine Vielzahl an Sensortechniken, die zusammen weite Bereiche des in Abbildung 6 dargestellten elektromagnetischen Strahlungsspektrums nutzen, zur Verfügung.

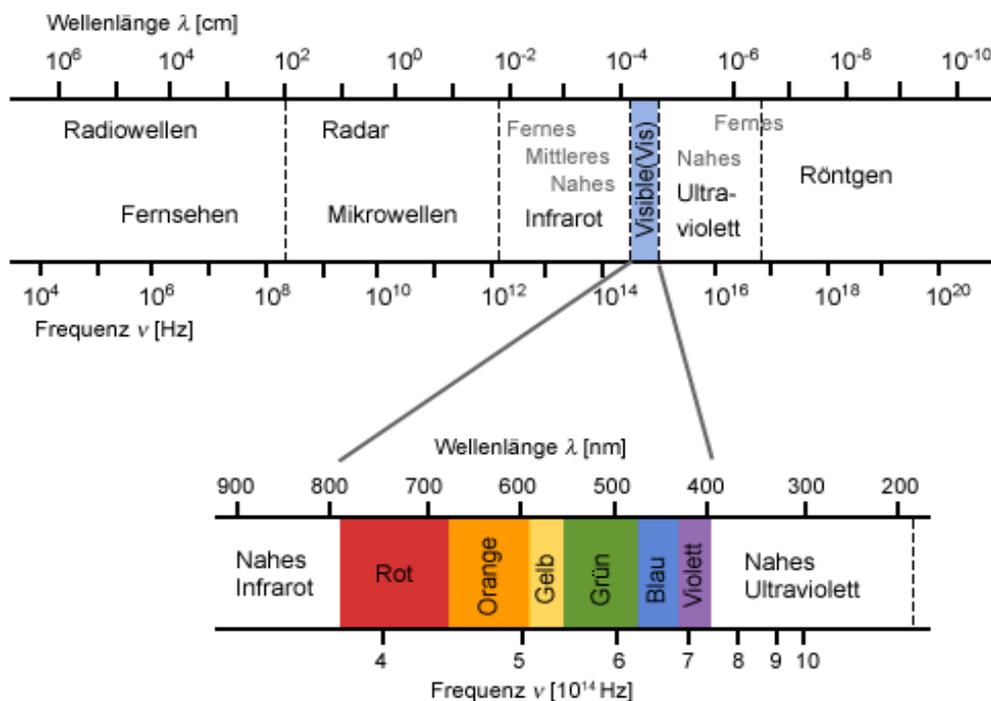


Abbildung 6: Elektromagnetisches Strahlungsspektrum; Quelle: (16)

Die Tabelle 2 gibt einen Überblick der genutzten Sensortechniken bzw. Sensoriken, materialspezifischen Eigenschaften und deren wesentliche Anwendungsfelder in der sensorgestützten Aufbereitung von primären mineralischen und metallischen Rohstoffen sowie sekundären Rohstoffen.

Der praktische sortiertechnische Einsatz konzentriert sich nach wie vor stark auf Sortierer, die mit VIS-Sensoriken arbeiten und somit im sichtbaren Bereich aktiv sind. Neben technischen sind letztlich wirtschaftliche Gründe für dieses Faktum verantwortlich. VIS-Sensoren werden in vielen Konsum- und Industriebereichen eingesetzt. Sie werden in großen Stückzahlen hergestellt und sind daher auch vergleichsweise preiswert und gut

verfügbar. Des Weiteren wurde die Entwicklung und Nutzung der NIR-Sensorik in den letzten fünfzehn Jahren verstärkt forciert und wird etwa in der Kunststoffaufbereitung sehr selbstverständlich und in hohen Stückzahlen eingesetzt (17), (18). Im Gegensatz zum Sekundärrohstoffbereich konnte sich diese Technik im Primärrohstoffbereich aber noch nicht etablieren.

| Sensorsystem | Eigenschaft | Anwendung |
|--|---|--|
| Radiometrisch | natürliche radioaktive (Gamma) Strahlung | Uran, radioaktiv kontaminierter Bauschutt |
| Röntgen-Transmission (XRT) | Absorption von Röntgenstrahlung (Atomdichte) | (Edel-)Metalle, Kohle, Diamanten, TV-Glas, bromierte oder chlorierte Kunststoffe, PVC von anderen Kunststoffen |
| Energie disperse Röntgen-Fluoreszenz (XRF) | elementare Zusammensetzung | Erze, (Edel-)Metalle, Glas |
| Röntgenfluoreszenz | sichtbare Fluoreszenz unter Röntgeneinstrahlung | Diamanten |
| UV | Reflexion/Transmission von ultravioletter Strahlung | Glas |
| LIF | Laser-induzierte Fluoreszenz (zumeist mit UV) | Erze, Industriemineralien (in Entwicklung) |
| VIS | Reflexion/Transmission von sichtbarer Strahlung | Erze, Industriemineralien, Salz, Glas, Metalle, Papier/Karton, Kunststoffe, Bauschutt, Edelsteine |
| LIBS | Laser-Emissionsspektroskopie | Feuerfest-Ausbruchmaterial, Metalle |
| NIR, MIR, FIR | Reflexion/Transmission von Infrarot-Strahlung | Industriemineralien, Kunststoffe, Papier/Karton |
| Terahertz | Charakteristische Absorption von großen Molekülen | Wassergehalt v. div. Rohstoffe, Kunststoffe (in Entwicklung) |
| Thermographie (TIR) | Mikrowellen Anregung und Thermale Infrarotdetektion | (Edel-)Metalle, Papier/Karton |
| elektromagnetische Induktion | Leitfähigkeit | Erze, Metalle |

Tabelle 2: Sensortechniken und deren mögliche Einsatzgebiete; Quelle: (13) adaptiert

In manchen Einsatzbereichen haben Aspekte der Arbeitsplatzsicherheit oder grundsätzliche Vorbehalte die Nutzung von röntgen-basierten Sensoren in der Vergangenheit gehemmt. Die bessere Verfügbarkeit von empfindlichen und langlebigen Röntgendetektoren, industrietauglichen Quellen und strahlenschutztechnische Verbesserungen, führten in den letzten Jahren zu vermehrtem Einsatz von XRT- und XRF-Sortierern, etwa in der Aufbereitung von Altglas, Altmetall oder Erzen (19), (20).

Aktuell laufen vielfältige Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die das Ziel haben weniger etablierte Techniken, wie LIBS (21), Thermographie (22) oder terahertz-basierte Sensortechnik (23), (24) für die sensorgestützte Sortierung besser nutzbar zu machen.

Zunehmend werden auch Sortiermaschinen mit mehreren Sensoren ausgestattet. Mit solchen sogenannten „Multisensor-Systemen“ lassen sich mehrere materialspezifische Charakteristika quasi gleichzeitig detektieren und in Kombination für eine Materialsortierung nutzen.

Die optische Sortierung wird in dieser Arbeit auf Festkörperobjekte angewendet, die natürlich entstanden sind wie Minerale, Salze und Erze oder künstlich hergestellt wurden wie Glas, Kunststoffe und Metalle. Auf die Grundlagen, die die relevanten Wechselwirkungseffekte von elektromagnetischer Strahlung mit Materie im festen Aggregatzustand dieser Art beschreiben, wird im Folgenden eingegangen. Insbesondere sind dabei die materialspezifischen optischen Eigenschaften kristalliner oder amorpher Festkörper bei Bestrahlung mit Licht vom ultravioletten über den sichtbaren bis in den nahinfraroten Bereich (200 bis 2.500 nm) im Fokus.

4.2 Elektromagnetische Strahlung

Die Frequenz ν [Hz] und Wellenlänge λ [m] der elektromagnetischen Strahlung sind nach (4.1) verkehrt proportional zueinander über die Lichtgeschwindigkeit c mit dem Wert $2,998 \cdot 10^8$ m/s verknüpft. Die Wellenzahl $\bar{\nu}$ [1/m], meist in [1/cm] angegeben, als Kehrwert der Wellenlänge, wird des Öfteren in der Literatur verwendet und sei der Vollständigkeit halber an dieser Stelle angeführt.

$$c = \lambda * \nu = \frac{c}{\bar{\nu}} \quad (4.1)$$

Nach der Wellen-Teilchentheorie (4.2) ist elektromagnetische Strahlung einer bestimmten Frequenz die Photonenenergie $E_{\text{photon}} [J]$ zugeordnet. Die Planck'sche Konstante h hat den Wert $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js (25).

$$E_{\text{photon}} = h * \nu = \frac{h * c}{\lambda} \quad (4.2)$$

In Tabelle 3 sind die relevanten Strahlungsbereiche nach DIN 5031 und in Tabelle 4 Farbbereiche mit den Bereichsgrenzen für verschiedene Kenngrößen zur Orientierung dargestellt. In der Literatur weichen die Bereichszuordnungen oftmals etwas voneinander ab. Diese Zuordnung soll als Basis für die weiteren Betrachtungen gelten.

| Strahlungsbereiche DIN 5031 | Wellenlänge λ [nm] | | Wellenzahl $\bar{\nu}$ [$\cdot 10^4$ cm $^{-1}$] | | Frequenz ν [$\cdot 10^{14}$ Hz] | | E _{photon} [eV] | |
|--------------------------------|-------------------------------|--------|---|-------|---|------|--------------------------|-------|
| | UV-C (Vakuum-UV, VUV) | 100 | 200 | 10,00 | 5,00 | 30 | 15 | 12,4 |
| UV-C (Fernes UV) | 200 | 280 | 5,00 | 3,57 | 15 | 10,7 | 6,2 | 4,4 |
| UV-B (Mittleres UV) | 280 | 315 | 3,57 | 3,17 | 10,7 | 9,5 | 4,4 | 3,9 |
| UV-A (Nahes UV) | 315 | 380 | 3,17 | 2,63 | 9,5 | 7,9 | 3,9 | 3,3 |
| VIS (Sichtbares Licht) | 380 | 780 | 2,63 | 1,28 | 7,9 | 3,9 | 3,3 | 1,6 |
| IR-A (Nahes IR) | 780 | 1 400 | 1,28 | 0,71 | 3,9 | 2,1 | 1,6 | 0,9 |
| IR-B (Nahes IR) | 1.400 | 3.000 | 0,71 | 0,33 | 2,1 | 1 | 0,9 | 0,4 |
| IR-C (Mittleres IR, MIR) | 3.000 | 50.000 | 0,33 | 0,02 | 1 | 0,06 | 0,4 | 0,025 |

Tabelle 3: Bezeichnung der Strahlungsbereiche, Wellenlängen, Wellenzahlen, Frequenzen und Photonenenergien; Quelle (26)

| VIS - Farbbereiche | Wellenlänge λ [nm] | | Wellenzahl $\bar{\nu}$ [$\cdot 10^4$ cm $^{-1}$] | | Frequenz ν [$\cdot 10^{14}$ Hz] | | E _{photon} [eV] | |
|--------------------|-------------------------------|-----|---|-----|---|-----|--------------------------|------|
| violett | 380 | 450 | 6,7 | 7,9 | 2,8 | 3,3 | 2,22 | 2,63 |
| blau | 450 | 495 | 6,1 | 6,7 | 2,5 | 2,8 | 2,02 | 2,22 |
| grün | 495 | 575 | 5,2 | 6,1 | 2,2 | 2,5 | 1,74 | 2,02 |
| gelb | 575 | 595 | 5,0 | 5,2 | 2,1 | 2,2 | 1,68 | 1,74 |
| orange | 595 | 625 | 4,8 | 5,0 | 2,0 | 2,1 | 1,60 | 1,68 |
| rot | 625 | 780 | 3,8 | 4,8 | 1,6 | 2,0 | 1,28 | 1,60 |

Tabelle 4: Bezeichnung der Farbbereiche, Wellenlängen, Wellenzahlen, Frequenzen und Photonenenergien

4.3 Wechselwirkung zwischen Licht und Festkörpern – makroskopisch

Die Funktion der optischen Sensortechnik beruht auf der Detektion der resultierenden Emissionsstrahlungen nach Wechselwirkung, wie in Abbildung 7 dargestellt, von elektromagnetischer Strahlung bzw. Licht¹ mit fester Materie bzw. Festkörpern. Das makroskopisch beobachtete bzw. gemessene Verhalten ist abhängig vom Spektrum bzw. der Photonenenergieverteilung der auftreffenden Strahlung sowie von der Struktur und der chemischen Zusammensetzung des Festkörpers.

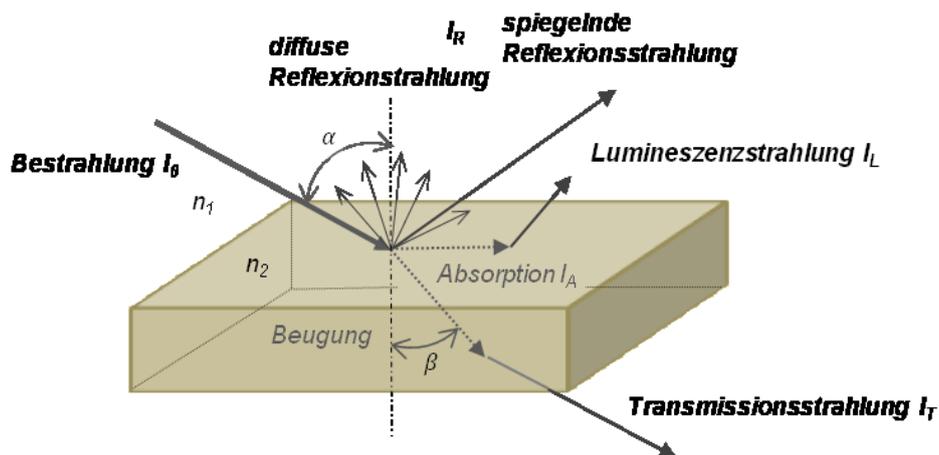


Abbildung 7: Emissionsarten bei Bestrahlung mit Licht

Die wesentlichen Emissionsarten sind

- die spiegelnde Reflexion,
- die diffuse Reflexion bzw. Streuung,
- die Transmission und
- unter bestimmten Umständen eine Remission mit Wellenlängenänderung bzw. Lumineszenz.

Bei nicht lumineszierenden Festkörpern zerfällt die einfallende Strahlung mit der Energieflussdichte bzw. Bestrahlungsstärke I_0 [W/m^2] nach (4.3) in die drei Anteile I_A , I_R , und I_T . Die Intensitätswerte der einzelnen Emissionskomponenten sind vom Einfallswinkel,

¹ Der Begriff „Licht“ sei auf den sichtbaren und die angrenzende Wellenlängenbereiche angewendet.

Spektrum der Strahlung und dem Festkörpermateriale, insbesondere dessen Oberfläche, abhängig.

$$I_0 = I_{A(bsorption)} + I_{R(eflexion)} + I_{T(ransmission)} \quad (4.3)$$

Einerseits treten Reflexionen an der Oberfläche des Festkörpers auf und sind stark von der Form und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Diese optischen Erscheinungen können mit Hilfe von Brechungs- und Reflexionsgesetzen beschrieben werden. Andererseits kommt es im Inneren von Festkörpern durch Absorption zu einer Reduktion des Photonenstroms und einer Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit und -richtung, welche als Beugung bzw. Refraktion bezeichnet wird (27), (28). Diese Erscheinungen werden durch den komplexen Brechungsindex beschrieben. Wobei nach (4.4) der Brechungsindex n der Realteil und der Absorptionsindex bzw. Extinktionskoeffizient κ der Imaginärteil des komplexen Brechungsindex \bar{n} ist (29).

$$\bar{n} = n + i\kappa \quad (4.4)$$

Geht eine Strahlung von Medium 1 in Medium 2 über, so gilt im Fall von nicht absorbierenden Medien der Zusammenhang (4.5) zwischen den Brechungsindizes n_i und den Ausbreitungsrichtungen in den Medien. Dazu sei auch zur Veranschaulichung auf die Darstellung in Abbildung 7 verwiesen.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (4.5)$$

Im Fall $n_2 < n_1$ liegt Totalreflexion vor und die gesamte Strahlung mit der Intensität I_0 wird im Idealfall nach (4.6) als I_R reflektiert (27).

$$I_R = I_0 \quad (4.6)$$

Beim Durchgang durch ein transparentes absorbierendes Medium bzw. Material wird die Intensität der einfallenden Strahlung nach dem Lambert-Beer-Gesetz (4.7) geschwächt. Dabei ist der Absorptionskoeffizient α gemäß (4.8) wellenlängenabhängig und x die Eindringtiefe bzw. Schichtdicke.

$$I(x) = I_0 * e^{-\alpha x} \quad (4.7)$$

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \quad (4.8)$$

Nach Durchgang durch den Festkörper mit der Stärke d entspricht $I(d)$ mit $x = d$ nach (4.9) der Transmissionsstrahlung I_T an der Oberfläche (29).

$$I(d) = I_T = I_0 * e^{-\alpha d} \quad (4.9)$$

In der Praxis werden I_T und/oder I_R detektiert und der absorbierte Anteil I_A rechnerisch nach (4.10) ermittelt.

$$I_A = I_0 - I_T - I_R \quad (4.10)$$

Der Transmissionsgrad T nach (4.11) als Verhältnis von Transmissionsstrahlung I_T zu einfallender Strahlung I_0 ist bei relativen Messmethoden, welche auch üblicherweise bei der optischen Sortierung zum Einsatz kommen, die charakterisierende Kenngröße.

$$T = \frac{I_T}{I_0} \quad (4.11)$$

Vereinzelt wird auch die Extinktion E als logarithmische Größe des Transmissionsgrades nach (4.12) angeben. Sofern durch Leer- oder Parallelmessung die Streuungs-, Beugungs- und vor allem Reflexionsverluste in I_0 berücksichtigt sind, wird statt von Extinktion von (dekadischer) Absorbanz A gesprochen (30).

$$E = -\log(T) = \log\frac{I_0}{I_T} \cong A \quad (4.12)$$

Es gibt zudem auch Festkörper bei denen Anteile der absorbierten Strahlung als Lumineszenzstrahlung I_L wieder an der Oberfläche austreten. Lumineszenzeigenschaften sind wesentlich für diese Arbeit und darauf wird unter 4.4.4 noch im Detail ausführlich eingegangen.

4.4 Wechselwirkung zwischen Licht und Festkörpern – atomar

Die Wechselwirkungen zwischen Licht und Festkörpern lassen sich auf atomarer Ebene mittels wellenoptischer und quantenmechanischer Modelle beschreiben. In diesem Abschnitt sollen die wesentlichen relevanten Effekte und Phänomene erörtert werden.

4.4.1 Festkörperchemie und –struktur

Atome können sich in einem Festkörper in einer Nah- oder Fernordnung befinden. Amorphe Materialien wie Gläser oder Polymere besitzen nur eine Nahordnung und sind unregelmäßig vernetzt, wie in Abbildung 8a am Beispiel von Quarzglas dargestellt.

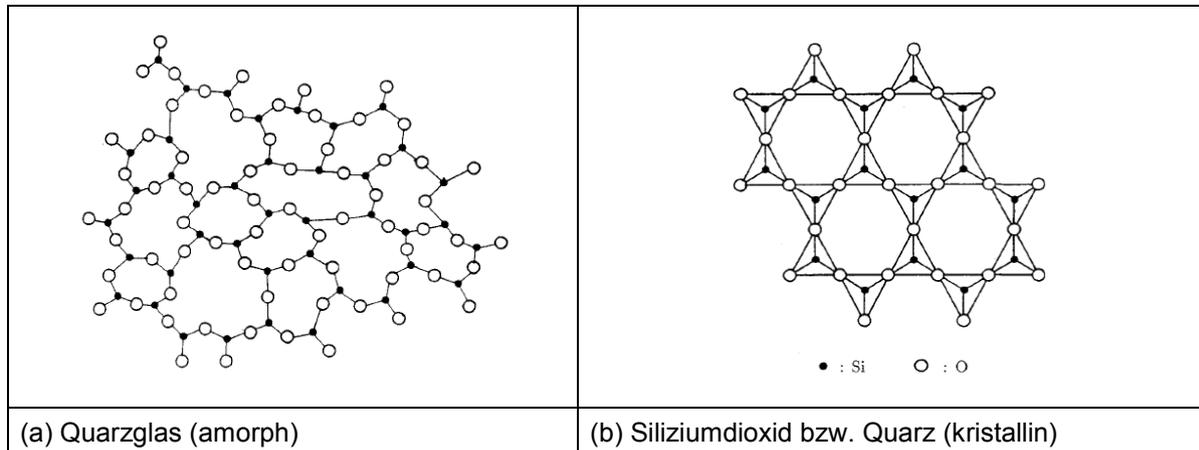


Abbildung 8: Festkörperstrukturen mit vernetzten SiO_4 -Tetraedern in ebener Darstellung, in der die nicht eingezeichnete vierte Tetraederecke nach unten oder oben gerichtet ist; Quelle (28)

Kristalline Materialien wie Metalle, viele keramische Stoffe und Mineralien weisen sowohl eine Nah- als auch Fernordnung auf. Als Beispiel dazu ist die Struktur des kristallinen Quarz in Abbildung 8b abgebildet. Die in diesen Materialien vorliegende Periodizität der atomaren Anordnung wird als Kristallstruktur bezeichnet und durch sogenannte Elementar- oder Einheitszellen beschrieben (27), (28).

Mit den von Auguste Bravais in 7 kristallographischen Achsensystemen definierten 14 Bravais-Gittern lassen sich alle kristallinen Festkörperstrukturen beschreiben. Eine Übersicht der Bravais-Gitter ist in Anhang A abgebildet. In Abbildung 9 sind beispielhaft Elementarzellen mit kubischer (a, b, d, e, f) und hexagonaler (c) Gitterstruktur dargestellt (27).

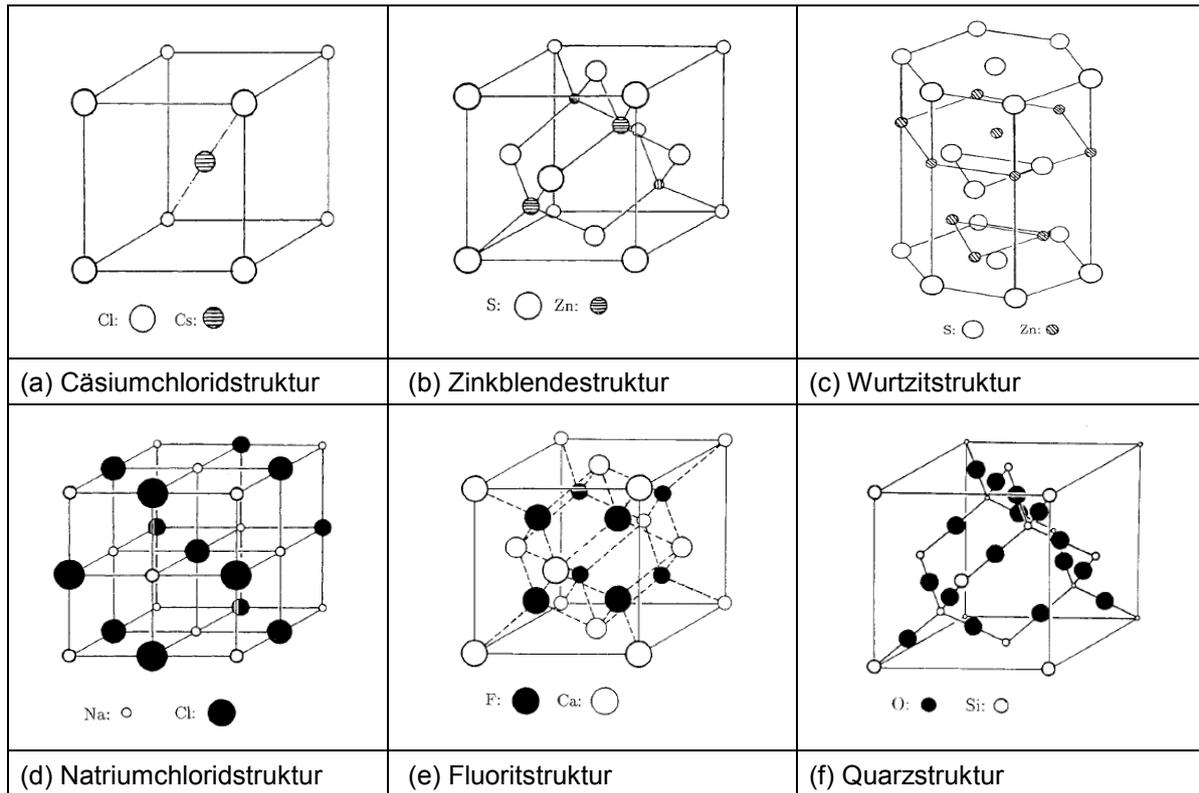


Abbildung 9: Beispiele zu Einheitszellen verschiedener Festkörperstrukturen; Quelle (28)

Die Größe und Elektronenkonfiguration der Atome, beschrieben durch die vier Quantenzahlen, bestimmen die Struktur und Bindungsart sowie die physikalischen und mechanischen Eigenschaften. Man unterscheidet metallische, kovalente, ionische Bindung und Van-der-Waals-Bindung. Die Bindungsenergie E_b [kJ/mol] ist ein Maß für die Stärke der Bindung. Sie ist in ionisch (600 – 1.500 kJ/mol) und kovalent (500 – 1.250 kJ/mol) gebundenen Stoffen besonders groß (27).

Alle realen Festkörper enthalten in Ihrer Kristallstruktur Abweichungen von der idealen atomaren Anordnung. Sogenannte Zwischengitterplätze bzw. Lücken zwischen den normalen Gitteratomen können beispielsweise mit anderen Atomen oder Ionen aufgefüllt werden. Die Zwischengitterdefekte und andere sogenannte Punktdefekte wie Leerstellen, Substitutions-, Frenkel- und Schottky-Defekte haben großen Einfluss auf die physikalischen und insbesondere optischen Eigenschaften kristalliner und amorpher Festkörper. Optische materialspezifische Eigenschaften ergeben sich somit aus der realen Zusammensetzung und dem chemischen sowie kristallographischen Aufbau bzw. der Matrix des vorliegenden Festkörpers (27).

4.4.1.1 Übersicht zur Glasstruktur und -arten

Für Glas gibt es historisch bedingt und in Abhängigkeit der wissenschaftlichen Betrachtungsweise unterschiedliche Definitionen. Eine sehr bekannte Definition bezieht sich auf den Einfriervorgang von Glasschmelzen und lautet: *"Im physikochemischen Sinn ist Glas eine eingefrorene unterkühlte Flüssigkeit."* (31). In der DIN 1259 steht die Definition: *"Glas ist ein anorganisches Schmelzprodukt, das im wesentlichen ohne Kristallisation erstarrt."* (32) und grenzt Glas auch deutlich von Kunststoffen ab.

Nach dem VT-Diagramm in Abbildung 10 sollte grundsätzlich bei Abkühlung einer Schmelze einer Substanz unter den Schmelzpunkt T_s Kristallisation einsetzen. Bei Glasschmelzen bleibt diese aus, da die Umlagerung der vernetzten molekularen Bausteine - wie beispielsweise der SiO_4 -Tetraeder in Quarzglasschmelzen - in Folge der hohen Zähigkeit bzw. Viskosität bei tiefen Temperaturen erschwert wird. Im Temperaturbereich T_g , der als Transformationstemperatur bezeichnet wird, geht die unterkühlte Glasschmelze vom plastischen in den für Glas typischen spröden Zustand über. Aus der Lage und dem Verlauf der V-Kurven unterhalb von T_g lässt sich eine geringere Packungsdichte von Glas gegenüber der kristallisierten Substanz gleicher Zusammensetzung ableiten (33).

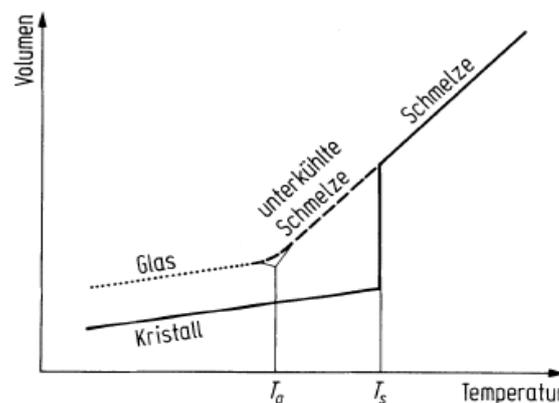


Abbildung 10: Volumenänderung einer Schmelze im Verlauf der Abkühlung bei Kristallisation und Glasbildung; Quelle: (31)

Über die Zahl und Art der Stoffkomponenten in der Glasschmelze sowie dem Temperaturverlauf kann die Netzwerkstruktur und die Eigenschaft des Glases beeinflusst werden. Die Netzwerktheorie von Zachariasen beschreibt die Glasbildung mittels Strukturregeln und teilt außerdem alle am Glasaufbau teilnehmenden Kationen bzw. Elemente in 3 Gruppen ein.

Die

- **Netzwerkbildner (network-former)**, wie Si, B, P, Ge, As, Be usw. - sie besitzen vorwiegend die Koordinationszahl (KZ) von 3 oder 4,
- **Netzwerkwaner (modifier)**, wie Na, K, Ca, Ba usw. - sie besitzen vorwiegend Koordinationszahlen von 6 oder größer und
- **Zwischenoxide**, wie Al, Mg, Zn, Pb, Be, Nb, Ta usw., sie besitzen vorwiegend Koordinationszahlen von 4 bis 6.

Die Zwischenoxide können je nach Glaszusammensetzung als Netzwerkbildner oder als Netzwerkwaner agieren. Alleine können Zwischenoxide jedoch kein Glas bilden (34).

Es gibt eine große Anzahl von Glasarten, welche sich nach der chemischen Zusammensetzung oder nach den Glaserzeugnissen bzw- dem Einsatzgebiet einteilen lassen. Am meisten verbreitet ist die Einteilung nach dem chemischen Aufbau. In Tabelle 5 sind dazu für diese Forschungsarbeit relevante Glasarten und deren Zusammensetzungsbereiche dargestellt.

| Bestandteil | Kalknatron-Silikatglas | Blei-Silikatglas | Boro-Silikatglas | Alumo-Silikatglas | Glaskeramik |
|-------------------------------------|------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------|
| SiO ₂ | 74 - 76 % | 50 - 60 % | 70 - 80 % | 52 - 60 % | 53 - 75 % |
| Na ₂ O, K ₂ O | 12 - 16 % | 10 - 15 % | 4 - 8 % | | |
| CaO, MgO | 8 - 13 % | | | < 15 % | |
| Al ₂ O ₃ | 1 - 7 % | | 2 - 7 % | 15 - 25 % | 12 - 36 % |
| PbO | | 20 ...30 % | | | |
| B ₂ O ₃ | | | 7 - 13 % | | |
| Li ₂ O | | | | | 2 - 15% |
| TiO ₂ , ZrO | | | | | 3 - 7 % |

Tabelle 5: Wesentliche Glasarten und deren Zusammensetzung; Quelle: zusammengestellt aus (33), (8) und (35)

Die drei Hauptgruppen Kalknatron-, Blei- und Boro-Silikatglas machen zusammen etwa 95 % des erschmolzenen Glases aus. Aus Kalknatron-Silikatglas werden überwiegend Hohl- und Flachglasprodukte hergestellt. Boro-Silikatglas wird unter anderem für Laborprodukte und Blei-Silikatglas für Trinkgläser oder als TV-Röhren- und Strahlenschutzglas eingesetzt. Glaskeramik zeichnet sich durch hohe Temperaturbeständigkeit aus und wird für

Ofenfenster- oder Kochgeschirrprodukte eingesetzt. Bei der Herstellung von Glaskeramik erfolgt eine gezielte Kristallisation bzw. Entglasung. Dazu werden der Grundglasschmelze hochschmelzende Oxide wie TiO_2 und ZrO beigegeben. Durch ein spezielles thermisches Verfahren wird die Kristallisation im verfestigten Glas ausgelöst bzw. gesteuert. Der Kristallanteil im Volumen kann zwischen 50 bis 90 % betragen. (33).

Verschiedenartige Färbungen bzw. spektrale Eigenschaften erzielt man durch Zugabe von Verbindungen mit Übergangsmetallen wie Cr, Mg, Fe, Co, Ni oder von Seltenerdmetallen wie Nd und Pr zur geeigneten Grundglasschmelze (33). Die in die Glasstruktur eingebauten färbenden Metallionen ergeben Farbtöne, welche auszugweise in Tabelle 6 aufgelistet sind und unterschiedlich stark von der Glasart beeinflusst werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von ionengefärbten Gläsern. Auf die relevanten Wechselwirkungen zwischen Licht und Festkörper wird unter 4.4.3 näher eingegangen.

| färbendes Metallion | Färbung |
|--------------------------------|---|
| Kupfer (Cu^{2+}) | schwach blau |
| Chrom (Cr^{3+}) | grün |
| Mangan (Mn^{3+}) | violett |
| Eisen (Fe^{3+}) | gelb-braun |
| Eisen (Fe^{2+}) | blau-grün |
| Kobalt (Co^{2+}) | intensiv blau, in Boratgläsern rosa |
| Kobalt (Co^{3+}) | grün |
| Nickel (Ni^{2+}) | je nach Glasstruktur grau-braun, gelb, grün, blau und violett |
| Vanadium (V^{2+}) | grün, in Boratgläsern braun |
| Titan (Ti^{3+}) | violett (reduziert geschmolzen) |
| Neodym (Nd^{3+}) | rot-violett |
| Praseodym (Pr^{3+}) | schwach grün |

Tabelle 6: Färbende Metallionen und deren Färbungswirkung in Gläsern; Quelle: (33)

4.4.1.2 Definition und Einteilung der Minerale

Die Minerale sind chemisch einheitliche, natürliche Bestandteile der Erde und anderer Himmelskörper. Sie können durch eine chemische Formel beschrieben werden. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, sind Minerale anorganisch, fest und kristallisiert (36).

Als Ausnahmen von dieser Regel bzw. Definition seien beispielsweise gediegenes Quecksilber (elementares Hg), der Opal ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) oder auch das seltene natürliche Kieselglas bzw. Lechatelierit (SiO_2), welches in der Natur als Bindemittel

zusammengeschmolzener Sandkörper vorkommt, genannt. Zur Unterscheidung zu einem natürlich entstanden Quarz, wird ein künstlich im Labor hergestellter Quarz als „synthetischer“ Quarz bezeichnet. Der synthetische Quarz ist zwar physikalisch und chemisch mit dem natürlichen Quarz identisch, jedoch als Kunstprodukt im Sinn der obigen Definition kein Mineral. In der überwiegenden Mehrzahl sind Minerale durch anorganische Vorgänge gebildet worden. Darüber hinaus gibt es aber auch wichtige biogene Prozesse, durch die Minerale in oder unter Mitwirkung von Organismen entstehen können. Ein Beispiel für ein Mineral organischen Ursprungs ist Apatit als ein wesentlicher Bestandteil von Knochen und Zähnen der Wirbeltiere (36).

In der wissenschaftlichen Mineralkunde werden die Minerale nach ihrer chemischen Zusammensetzung und dem strukturellen Aufbau klassifiziert. Die Klassifikation der Minerale erfolgt üblicherweise in Anlehnung an die international bewährten *Mineralogischen Tabellen* von Strunz (1982) bzw. Strunz u. Nickel (2001). Sie beinhaltet, wie in Anhang B dargestellt, neun und in der Version von 2001 (37) zehn Hauptklassen, da die Borate als eigene Hauptklasse geführt werden (36), (38).

Minerale bilden die Bestandteile bzw. Gemengeteile von Gesteinen und bauen als solche wesentliche Teile der Erde, des Mondes und der erdähnlichen Planeten auf. Von den mehr als 4.000 bekannten Mineralien sind aber nur einige Dutzend am Aufbau der Gesteine wesentlich beteiligt. Je nach Mengenanteil des Minerals im Gestein unterscheidet man Hauptgemengeteil, Nebengemengeteil und Übergemengeteil. Als Übergemengeteil werden Minerale in Gesteinen bezeichnet, welche normalerweise untergeordnet erscheinen, aber lokal mit hohem Gehalt auftreten und charakterisierend für das Gestein sind. Die Gesteine werden entsprechend ihrer Entstehung in Magmatite, Sedimente und Metamorphite eingeteilt (38).

4.4.2 Streuung und Interferenz an Mikrostrukturen

Einige Mineralien wie der Mondstein bilden bei ihrer Entstehung laminare Mikrostrukturen aus. Der mittlere Abstand der Lamellen hängt von den Abkühlungsbedingungen und der Zusammensetzung ab. Liegt er im Bereich von 200 bis 300 nm erscheint der Mondstein in Folge von Rayleigh-Streuung blau gefärbt. Bei größeren Abständen wirkt er in Folge von Mie-Streuung milchig. Man spricht von *Adulareszenz*. Beim Opal bilden die amorphen, farblosen und transparenten Quarzkügelchen mit einem Durchmesser von 150 bis 300 nm ein unregelmäßiges dreidimensionales optisches Gitter aus. Dies führt zu Interferenzen sowie Streuung und vielfältigen Farbeffekten. Man spricht von *Opaleszenz* (39), (40).

4.4.3 Absorption

4.4.3.1 Bandstruktur und -übergänge

Festkörper bestehen aus einer großen Anzahl von Atomen. Durch die Wechselwirkung der Atome untereinander entstehen in Festkörpern aus den diskreten Niveaus freier Atome kontinuierliche Energiebänder. In Abbildung 11 ist beispielsweise schematisch die Evolution der s- und p- artigen atomaren Zustände über die s- und p-bindenden bzw. antibindenden Orbitale des Moleküls zu den Valenz- und Leitungsbändern des kristallinen Festkörpers dargestellt. Der Energieabstand E_g zwischen Valenz- und Leitungsband wird auch als (fundamentale) Bandlücke bezeichnet (41).

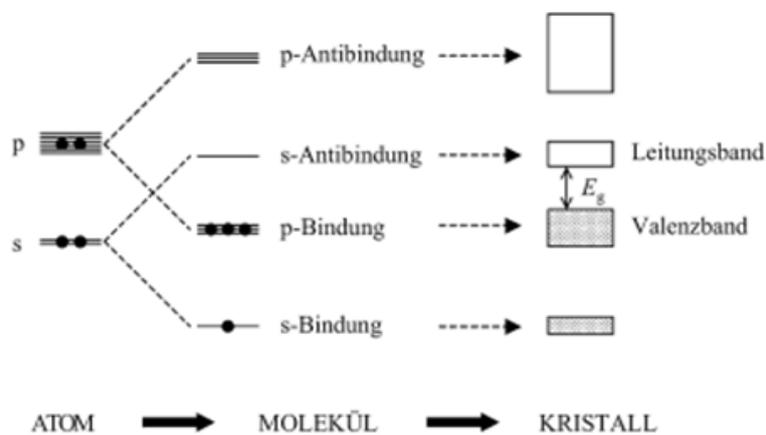


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Evolution der Elektronenniveaus eines viervalenten Atoms (Si, Ge, ... oder einer binären Verbindungen wie GaAs); Quelle (41)

Die nicht aufgefüllten Energieniveaus von Atomen und deren Aufspaltung in Folge der Bindungskräfte in Festkörpern definiert wesentlich deren optischen bzw. spektralen Eigenschaften. Die optischen Eigenschaften der kristallinen Festkörper sind eng mit den elektrischen Eigenschaften verknüpft. Es ergeben sich (erlaubte) Übergänge die für die Absorption und Emission von Licht im visuellen und angrenzenden Wellenlängenbereich geeignet sind (26), (41).

Eine grobe Einteilung der Festkörper ist nach ihrer elektrischen Leitfähigkeit möglich und steht damit in direktem Zusammenhang mit der Bandlücke E_g . In Abbildung 12 sind schematisch die Bändermodelle der Metalle, Halbleiter, Isolatoren und dotierter Halbleiter dargestellt.

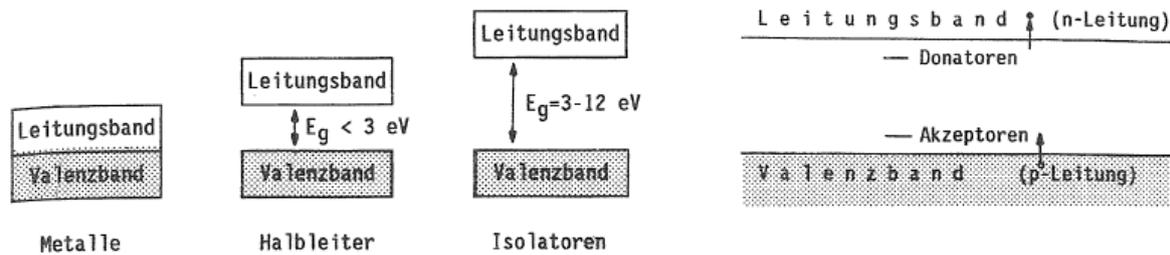


Abbildung 12: Schematische Bändermodelle der Metalle, Halbleiter, Isolatoren und dotierter Halbleiter; Quelle: (40)

Bei Metallen ($E_g \sim 0 \text{ eV}$) überlappen sich Valenzband und Leitungsband. Das Leitungsband ist teilweise besetzt. Da für die Leitungselektronen keine Energielücke existiert, können sie Photonen beliebig kleiner Energie absorbieren (Intra-Bandübergänge) (40). Metalle sollten ungefärbt bzw. schwarz ohne Transparenz erscheinen. Stattdessen beobachtet man an Metallen wie Aluminium (Al) und Silber (Ag) starke Reflexionen, die darauf beruhen, dass die angeregten Elektronen sofort wieder in ihren Ausgangszustand zurückfallen und Photonen mit einer Energie gleich der Anregungsenergie abgeben (27). Kupfer (Cu) und Gold (Au) wiederum zeigen beispielsweise typische Eigenfärbungen, die darauf beruhen, dass auch aus dem vollbesetzten d-Band – entstanden durch die Überlappung der d-Orbitale – Elektronen angeregt und ins Leitungsband gehoben werden. Die Anregungsenergie beträgt für Kupfer $>2,3 \text{ eV}$ und Wellenlängen $< 570 \text{ nm}$ werden absorbiert. Dadurch kommt es zur typischen rot-braun Färbung. Bei Gold liegt die Anregungsenergie mit $>2,4 \text{ eV}$ etwas höher. Dies ist verantwortlich für die gelbe Farbe (39).

Bei Isolatoren ($E_g > 3 \text{ eV}$) ist die Bandlücke so groß, dass keine Absorption durch gebundene Elektronen bzw. Inter-Bandübergänge im sichtbaren Bereichen stattfinden kann. Isolatoren wie Gläser, Keramiken und viele Mineralien sind daher in reiner Form durchsichtig bzw. transparent. Im Infrarotbereich sind Verunreinigungen wie FeO und die Anregung von OH-Gruppenschwingungen die Ursache für Absorptionsbanden. Darüber hinaus führt die Anregung von Gitterschwingungen zu einem starken Abfall der Transmission. Dazu sei auch auf Absatz 4.4.3.5 verwiesen. Im ultravioletten Bereich fällt die Transmission in Folge von Inter-Bandübergängen scharf ab. Dieser signifikante Abfall der Durchlässigkeit, wie er in Abbildung 13 skizziert ist, wird als UV-Absorptionskante bzw. "UV-Cut-Off" bezeichnet. Seine Lage ist durch die Bandlücke E_g des Isolators bestimmt. In der Lichtspektroskopie versteht man darunter jene Wellenlänge, bei der eine 5 mm dicke Glasprobe eine definierte Durchlässigkeit bzw. Transmission hat und mit λ_g bezeichnet wird. In der Literatur werden

unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der Absorptionskante angeben (34). Eine Möglichkeit der Festlegung, die in dieser Arbeit zur Anwendung kommt, ist die geradlinige Extrapolation des steil abfallenden Teils der Kurve und Ermittlung des Schnittpunktes λ_0 mit der λ -Achse.

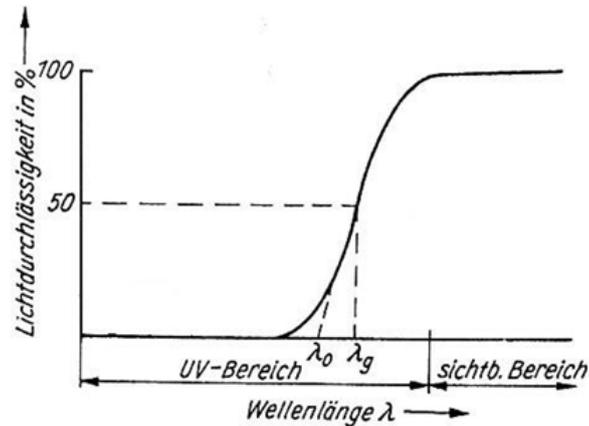


Abbildung 13: Festlegungsmöglichkeit der UV-Absorptionskante; Quelle: (34)

In Tabelle 7 sind stellvertretend Transparenzbereiche einiger kristalliner Isolatoren angegeben (41).

| Bezeichnung | Chemie | Transparenzbereich [nm] |
|-------------|-------------------------|-------------------------|
| Saphir | Al_2O_3 | 200-6000 |
| Diamant | C | 250-80000 |
| Kochsalz | NaCl | 210-20000 |
| Quarz | SiO_2 | 200-3000 |
| Rutil | TiO_2 | 450-5000 |

Tabelle 7: Transparenzbereich für verschieden kristalline Isolatoren; Quelle: (41)

Durch Einbau von Dotierstoffen können in Bandlücken sogenannte Akzeptor- und Donatorbänder erzeugt werden, sodass Wechselwirkungen mit sichtbarem Licht möglich sind. So erklärt sich beispielsweise auch die Existenz von gelben (dotiert mit Stickstoff) und blauen (dotiert mit Bor) Diamanten (39).

Eigenhalbleiter ($E_g < 3$ eV) nehmen eine Zwischenstellung zwischen Metallen und Isolatoren ein. Sofern die Bandlücke, wie beispielsweise im Fall des rotgefärbten Zinnober (HgS) mit etwa 2 eV, in den sichtbaren Bereich reicht, sind sie farbig (39). Silizium (Si) oder Galliumarsenit (GaAs) mit einer Bandlücke von etwa 1,12 bzw. 1,42 eV absorbieren im

sichtbaren und sind im infraroten Wellenlängenbereich transparent. Wie bei Isolatoren können durch Dotierung von Halbleitern Energieniveaus in der Bandlücke erzeugt werden, sodass Wechselwirkungen mit sichtbarem Licht möglich sind. Dotierte Halbleiterwerkstoffe sind auch die Basis für viele optische Detektoren (27).

4.4.3.2 Farbzentren

Die ionengebundenen Alkalihalogenide (Abbildung 9 a und d) haben kubische Struktur und ihre Bandlücken mit ca. 10 eV weisen sie eindeutig als Isolatoren aus. Sie absorbieren daher kein sichtbares Licht und sind als Rein-Kristall farblos und transparent. Es ist möglich, den Aufbau von Alkalihalogenid-Kristallen (z.B. NaCl) so zu beeinflussen, dass ein Überschuss von Alkaliatomen entsteht. Der Mangel an Halogenatomen führt zu Leerstellen bzw. Anionenlücken im Kristall. Die Valenzelektronen überschüssiger Alkaliatome sind nicht gebunden und werden, wie in Abbildung 14 dargestellt, in Anionenlücken eingefangen. Ein derart eingefangenes Elektron bezeichnet man auch als Farbzentrum bzw. F-Zentrum und kann als „Teilchen im Kasten“ betrachtet werden. Die Bewegung des Elektrons im elektrostatischen Feld der die Lücke umgebenden Alkaliionen führt zu diskreten Energiezuständen. Der Abstand dieser Energieniveaus E_a ist verkehrt proportional zum Quadrat der Größe des Kastens bzw. zur Gitterkonstanten a und beträgt je nach Material einige eV, wodurch eine charakteristische Färbung der Kristalle erfolgt (26), (40).

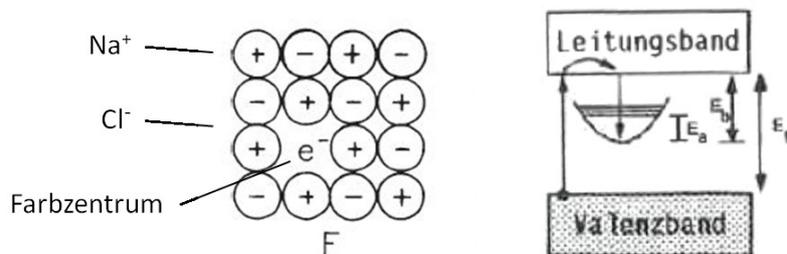


Abbildung 14: F-Zentrum in Folge eines Punktdefektes bzw. Leerstelle; Quelle: (26), (40) adaptiert

Häufig sind Minerale wie beispielsweise Fluorit (CaF_2) oder Sylvit (KCl) mit Farbzentren blau, violett, purpurrot bis rosa gefärbt (40). Außer den beschriebenen einfachen F-Zentren gibt es noch eine Reihe anderer Farbzentren. Neben der Erzeugung mittels Überschuss von Alkaliatomen können Farbzentren durch Bestrahlung mit Röntgen-, Gamma-, Elektronen-, oder Neutronenstrahlung sowie durch Dotierung mit Verunreinigungen entstehen(39).

4.4.3.3 Kristallfeldeffekte

Sehr häufig werden optische Übergänge und Farben durch eingebaute Fremdatome in ionischen Kristallen hervorgerufen. Es handelt sich dabei um Übergangsmetalle wie Cr, Co, Ni oder um Seltenerdmetalle wie Nd, Ho oder Er. Diese Elemente haben optisch aktive ungefüllte innere 3d- bzw. 4f-Schalen. Sie sind in bestimmten Mineralien natürlich enthalten, werden aber auch in synthetische Kristalle dotiert und bilden die Grundlage vieler Festkörperlaser. Elektronen, die an derartige Fremdatome gebunden sind, haben charakteristische Energiezustände, die durch die Fremdatome und die Wirkung des umgebenden Kristallgitters bzw. Kristallfeldes bestimmt sind. Die sogenannte Kristallfeldtheorie beschreibt in ihrer einfachsten Form die elektrostatische Wechselwirkung zwischen Fremdatomen bzw. Zentralatom (Kation) und den sogenannten Liganden (Anionen) (41).

Die durch das Kristallfeld verursachte Verschiebung bzw. Aufspaltung der Energieniveaus des Fremdatoms kann störungstheoretisch berechnet werden. Ausgangspunkt ist die Energieniveaustuktur des freien Ions, wobei die Elektronen in den Hauptschalen angeordnet sind. Sukzessive werden immer kleinere Störungen hinzugefügt. Modellmäßig wird das Kristallfeld durch den zusätzlichen Wechselwirkungsterm \hat{H}_{CF} im sogenannten Hamiltonoperator, welcher zur Beschreibung der Energieniveaus von Quantensystemen dient, repräsentiert. \hat{H}_0 , \hat{H}_C und \hat{H}_{SO} in (4.13) und (4.14) repräsentieren die Terme für das freie Ion. Es gibt zwei grundsätzliche verschiedene Ansätze, die Methode des schwachen Feldes (4.13) und die Methode des starken Feldes (4.14), welche nahtlos ineinander übergehen (39).

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_C + \hat{H}_{CF} (+\hat{H}_{SO}) \quad (4.13)$$

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_{CF} + \hat{H}_C (+\hat{H}_{SO}) \quad (4.14)$$

$\hat{H} \dots$ Summenwechselwirkung

$\hat{H}_0 \dots$ Kern-Elektronen-Wechselwirkung + kinetische Energie der Elektronen

$\hat{H}_C \dots$ Elektronen-Elektronen- oder Coulomb-Wechselwirkung

$\hat{H}_{CF} \dots$ Kristallfeld-Wechselwirkung

$\hat{H}_{SO} \dots$ Spin-Bahn-Wechselwirkung

Bei Übergangsmetallen ist \hat{H}_C viel wichtiger als \hat{H}_{SO} . Jeder zusätzliche Wechselwirkungsterm im Hamiltonoperator führt im Allgemeinen zu einer Aufspaltung von zuvor entarteten Energieniveaus. Dies wiederum bedeutet, dass es in Folge des Kristallfeldes zu einer Aufspaltung der Energieniveaus kommt.

Die Grundzüge der Kristallfeldtheorie werden hier anhand oktaedrischer und tetraedischer Koordination erläutert. Das sind die beiden Geometrien, die man um zentrale Metallionen in Festkörpern besonders häufig findet. In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind die beiden Koordinationspolyeder und die entsprechende Aufspaltung der d-Orbitale dargestellt. Die Größe der Aufspaltung ist ein Maß für die Kristallfeldstärke $10Dq$ (39), (40).

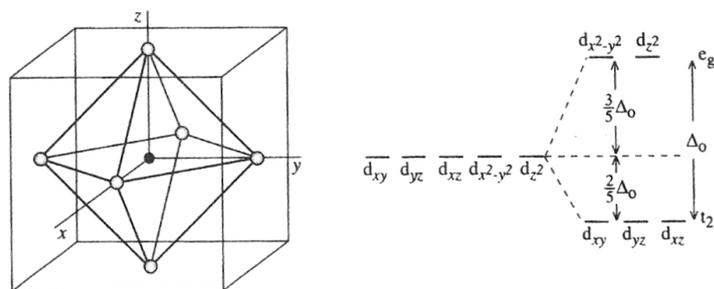


Abbildung 15: Kristallfeldaufspaltung bei oktaedrischer Koordination mit $10Dq = \Delta_o$; Quelle: (40)

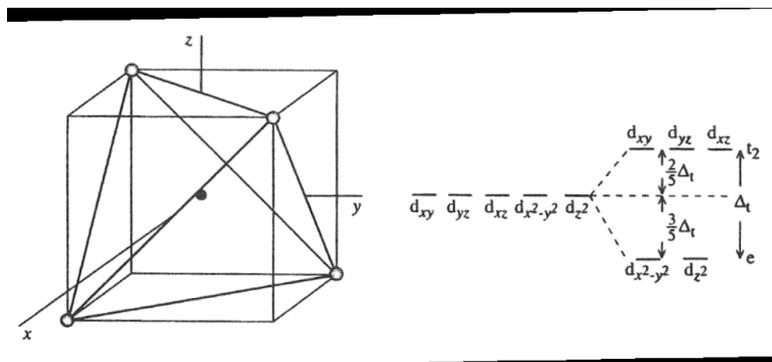


Abbildung 16: Kristallfeldaufspaltung bei tetraedischer Koordination mit $10Dq = \Delta_t$; Quelle: (40)

Ein konkretes Beispiel für Energieniveaus, die von Fremdatomen in einem Kristall stammen, bilden die Zustände von Chromionen in einem Rubinkristall. Dieser besteht aus Aluminiumoxid (α - Al_2O_3 , Korund) mit hexagonaler Struktur, dem etwa 0,05 % Chrom beigegeben ist. Beim Gitteraufbau des Rubins werden einige Al^{3+} -Ionen durch Cr^{3+} -Ionen ersetzt. Das elektrostatische oktaedrische Kristallfeld, das die Cr^{3+} -Ionen beeinflusst, ist in seiner Wirkung kleiner als die Coulomb-Wechselwirkung der Elektronen im Atom (26). Die

Wirkung, ausgehend von Methode des schwachen Feldes, des Kristallfeldes auf die Energierterme der Cr^{3+} -Ionen ist in Abbildung 17 in Form eines Tanabe-Sugano-Diagramms dargestellt.

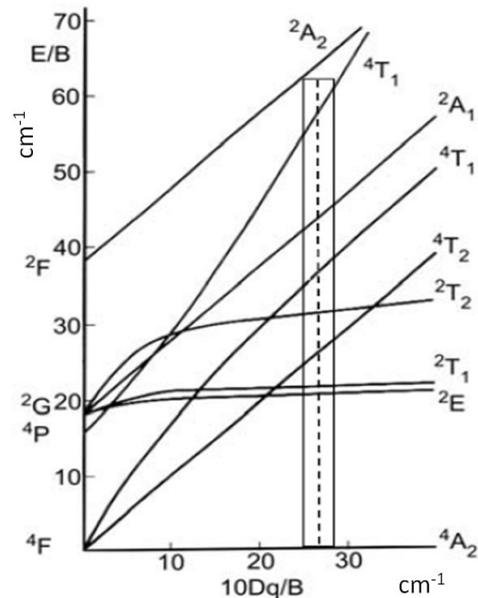


Abbildung 17: Tanabe-Sugano-Diagramm für $3d^3$ -Ionen (Cr^{3+}) im Oktaederfeld Δ_0 ; Quelle: (40)

Beim Tanabe-Sugano-Diagramm wird, ausgehend von den berechneten Energien der freien Ionen S, P, D, F, G, ... die Aufspaltung der Energieniveaus als Funktion der Kristallfeldstärke dargestellt. Der Grundzustand liegt in der Abszisse und die Skalierung ist auf den ionenspezifischen Racah-Parameter B normiert. Die zur Bezeichnung der Energiezustände im Kristallfeld verwendeten Buchstaben A, E, T, ... geben Symmetrieeigenschaften der Elektronenverteilungen an. Die gestrichelte Linie entspricht der Kristallfeldstärke im Rubinkristalls ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$). Die Schwingung des Koordinationspolyeders führt zu einer kontinuierlichen Variation der Kristallfeldstärke am Ort des Cr^{3+} -Ions und statt diskreter Energiezustände treten in Folge der Gitterschwingung sogenannte vibronische Bänder auf. Unter Berücksichtigung der Auswahlregel, nach der nur Übergänge mit gleicher Spin-Multiplizität erlaubt sind, können die optisch aktiven Übergänge bestimmt werden. Für den Rubin sind die Übergänge ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$ und ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_1$ farbgebend (26), (40). Wie aus dem Absorptionsspektrum in Abbildung 18 ersichtlich ist, liegen die diesen Übergängen zugeordneten Absorptionspeaks bei 24.500 und 18.000 cm^{-1} . Die Absorptionsminima im blauen und roten Bereich verursachen den typischen Blaustich der roten Farbe des Rubins.

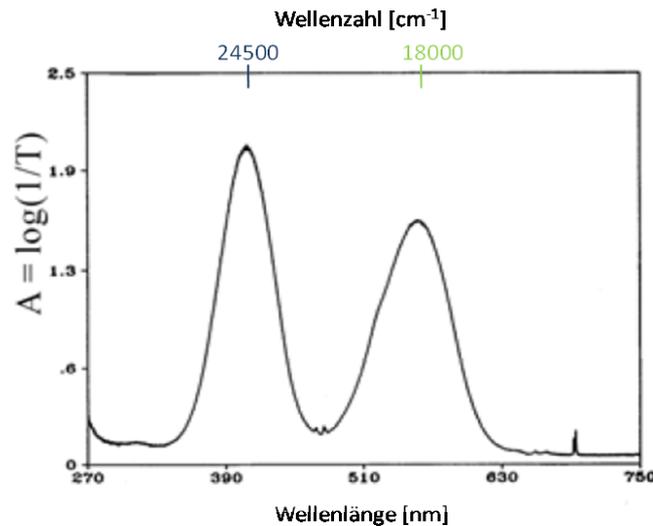


Abbildung 18: Absorptionsspektrum eines Rubinkristalls (Al₂O₃:Cr³⁺); Quelle (39) – eigene Messung Dr. Gatterer

Im Unterschied zu den breiten Absorptionsbanden der Übergangsmetallionen bestehen die optischen Spektren von Ionen der Seltenerdmetalle im Wesentlichen aus diskreten Linien. Die Wirkung des Kristallfeldes ist klein gegenüber der inneratomaren Wechselwirkung, da die 4f-Schale durch Elektronen in äußeren Schalen gegen das Kristallfeld abgeschirmt ist. Die Energiezustände der Seltenen Erden sind daher in Kristallen nahezu die gleichen wie die der freien Ionen (26).

4.4.3.4 Ladungsübertragung (Charge-Transfer-Übergänge)

Die Absorption von Licht kann mit der Ladungsübertragung zwischen benachbarten Metallionen (Metall-Metall-Übergang) und zwischen Ligand und Metallion (Ligand-Metall-Übergang) gekoppelt sein. Metall-Metall-Ladungsübertragung erfolgt zwischen verschiedenwertigen Ionen eines Elements (z.B.: Fe²⁺ - Fe³⁺) oder unterschiedlichen Elementen (z.B.: Fe²⁺ - Ti⁴⁺), deren Koordinationspolyeder über gemeinsame Kanten oder Flächen verknüpft sind. Dies führt zu teilweise stark ausgeprägter Anisotropie der optischen Eigenschaft in Folge von Metall-Metall-Ladungsübergangsabsorption bei Einkristallen. Die Absorptionsbanden liegen vorzugsweise im sichtbaren bis nahinfraroten Wellenlängenbereich. Bei der Ligand-Metall-Ladungsübertragung tritt ein Elektron vom Liganden – bei Mineralien zumeist Sauerstoff - auf das zentrale Metallion über (z.B.: O²⁻ - Fe³⁺). Die Absorptionsbanden in Folge von Liganden-Metall-Ladungsübertragung liegen vorzugsweise im ultravioletten Wellenlängenbereich. Die beschriebenen Ladungsübertragungsarten treten häufig in Kombination mit Kristallfeldeffekten auf und die Absorptionsbanden überlagern sich dabei. Das Absorptionsspektrum eines blauen Korund (Al₂O₃:Fe²⁺,Ti⁴⁺) bzw. Saphirs in Abbildung 19, das mit senkrecht zur kristallographischen c

Achse polarisiertem Licht gemessen wurde, zeigt neben der Flanke der O^{2+} - Fe^{3+} -Übertragungsbande oberhalb von 25.000 cm^{-1} eine breite Fe^{2+} - Ti^{4+} -Übertragungsbande bei 17.000 cm^{-1} und eine sehr intensive Fe^{2+} -Kristallfeldbande bei 11.300 cm^{-1} . Durch die Fe^{2+} - Ti^{4+} -Übertragungsbanden wird das farbgebende Absorptionsminimum im Blaubereich verursacht (40).

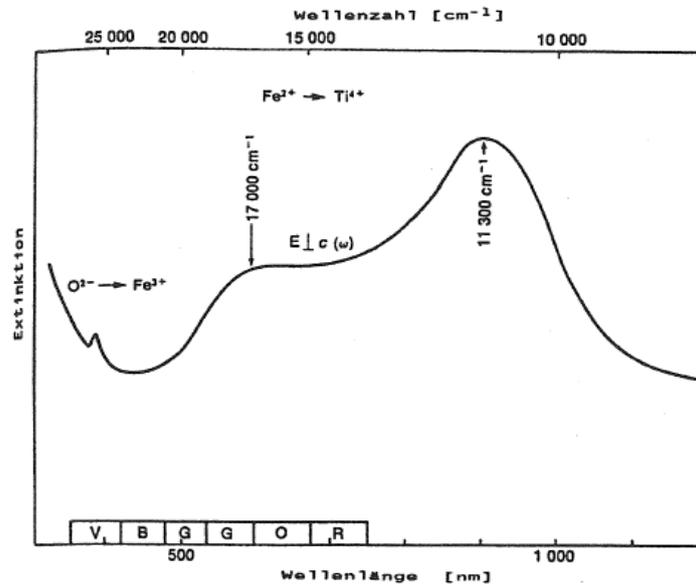


Abbildung 19: Polarisiertes Absorptionsspektrum eines blauen Saphirs mit Zuordnung der Übergangsbänder; Quelle: (40)

4.4.3.5 Schwingungsanregung von Gruppen

Lassen sich die Absorptionseigenschaften von Festkörpern im UV- und VIS-Bereich im Wesentlichen mit den zuvor angeführten Modellen gut beschreiben, so wird für den NIR- und MIR-Bereich das Konzept der Molekül- bzw. Gruppenschwingung verwendet.

Ein Molekül wird dazu als System von verschiedenen Atomen, die über Bindungskräfte in Form von Federn miteinander verbunden sind, beschrieben. In Abbildung 20 ist das einfachste System mit zwei Atomen dargestellt. Ein System dieser Art lässt sich als harmonischer (grüne Potentialkurve) oder realistischer als anharmonischer (blaue Potentialkurve) Oszillator beschreiben.

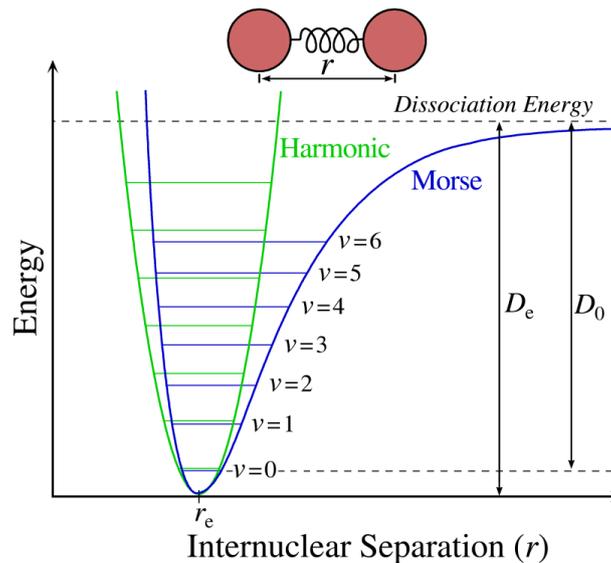


Abbildung 20: Einfaches Molekülmodell mit Potentialkurve für harmonische (grün) und anharmonische (blau) Oszillation²; Quelle: (42)

Durch Energieaufnahme können die Atome zu Schwingungsbewegungen bzw. Oszillation um ihre Gleichgewichtslage r_e angeregt werden. Wie die Energie der Elektronen, ist auch die Schwingungsenergie gequantelt und kann nur bestimmte Werte entsprechend der Schwingungsquantenzahl v annehmen. Die möglichen molekularen Energiezustände sind nach (4.15) gegeben. In (4.15) wird die Planck'sche Konstante durch h und die Oszillatorfrequenz durch ν repräsentiert. Die Oszillatorfrequenz ergibt sich aus der reduzierten Masse μ und der Federkonstanten k (43). Die Differenz zwischen den Energieniveaus E_0, E_1, E_3, \dots ist gering, dadurch ergibt sich die Infrarotaktivität der Übergänge.

$$E_v = h * \nu * \left(v + \frac{1}{2}\right) = \frac{h}{2\pi} * \sqrt{\frac{k}{\mu}} * \left(v + \frac{1}{2}\right) \quad v = 1, 2, 3, \dots \quad (4.15)$$

Das Modell der anharmonischen Oszillation beinhaltet auch die Nullpunkt-Energie D_0 und die Dissoziationsenergie D_e , bei der die Bindung aufbrechen würde. Im Unterschied zum harmonischen Oszillator sind die Energiestufen überdies nicht äquidistant und gilt die Auswahlregel $\Delta v = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Dies bedeutet, dass Übergänge über eine oder - allerdings mit stark reduzierter Übergangswahrscheinlichkeit - mehrere Stufen möglich sind. Ein Übergang von $v = 0$ auf $v = 1$ wird als Grund- bzw. Fundamentalschwingung, von $v = 0$ auf $v = 2$ als erste Oberschwingung, von $v = 0$ auf $v = 3$ als zweite Oberschwingung usw.

² ν entspricht der Schwingungsquantenzahl v im Text

bezeichnet. Neben den Grund- und Oberschwingungen treten auch Kombinationsschwingungen nach (4.16) mit dem Frequenzbetrag ν_{kombi} auf. Sie kommen beispielsweise zustande, wenn zwei oder mehrere Fundamentalschwingungen gleichzeitig angeregt werden (43).

$$\nu_{kombi} = a * \nu_1 \pm b * \nu_2 \pm c * \nu_n \pm \dots \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.16)$$

Grundsätzlich kommt es zu Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung bzw. zur Anregung von Molekülen bzw. Atomgruppen sofern damit Dipolmomentänderungen verbunden sind. In Festkörpern wie beispielsweise ionischen Kristallen können periodische sich wiederholende molekulare Translationen bzw. Gitterschwingungen im langwelligen IR-Bereich gut angeregt werden und zeigen sehr intensive Absorptionsbanden. Die Absorptionsbanden der Ober- und Kombinationsschwingungen sind deutlich schwächer ausgeprägt (43).

4.4.4 Lumineszenz

Allgemein wird bei Festkörpern der Prozess der Strahlungsemission, vorzugsweise im sichtbaren Bereich, als Lumineszenz bezeichnet. Je nach Ursache werden verschiedene Arten wie Elektro-, Röntgen-, Bio- oder Photolumineszenz unterschieden (40). Die für die diese Arbeit relevante Photolumineszenz ist der, der Absorption entgegengesetzte Prozess und steht mit dieser in direktem Zusammenhang. Während bei der Absorption Photonen durch die Anregung der Elektronen vernichtet werden, kommt die Lumineszenz durch die Rekombination angeregter Elektronen unter Abgabe von Photonen mit geringerer Energie zustande. Solche Rekombinationen werden als strahlende Übergänge bezeichnet. Rekombinationen, die keine Photonenemission hervorrufen, etwa durch Abgabe der Energie an andere Elektronen oder Rekombinationszentren bzw. Quencher und Anregung von Gitterschwingungen bzw. thermischer Energieübertragung, werden als nichtstrahlende Übergänge bezeichnet (44).

Lumineszenz wird als Oberbegriff für Fluoreszenz und Phosphoreszenz verwendet. Von Phosphoreszenz spricht man üblicherweise bei langer Lebens- bzw. Nachleuchtdauer im Bereich von Millisekunden bis Minuten. Von Fluoreszenz spricht man hingegen bei kurzen Nachleuchtdauern im Bereich von Nanosekunden bis zu einer Millisekunde. Die Grenze ist allerdings fließend und wird in der Literatur unterschiedlich gesetzt. Als Kennwert wird die Abklingzeit bzw. Lebensdauer τ [s] herangezogen. Nach (4.17) ist τ jene Zeit nach der die Lumineszenzintensität I_L auf etwa $I_{L0}/3$ gesunken ist (40), (45).

$$I_L = I_{L0} e^{-\frac{t}{\tau}} \rightarrow \ln \frac{I_L}{I_{L0}} = -\frac{t}{\tau} \quad (4.17)$$

Zur Erläuterung der Lumineszenz werden vorzugsweise das Bändermodell und das Energie-Konfigurationskoordinaten-Diagramm herangezogen.

Das Bändermodell ist geeignet für Systeme bei denen Elektronen die Atome verlassen und sich im Gitter bewegen, wie beim Übergang eines Elektrons zwischen Valenz- und Leitungsband in Folge von Strahlungsabsorption in Halbleitern. Die strahlende Elektronen-Loch-Rekombination spielt dabei eine zentrale Rolle. In Abbildung 21 sind wesentliche Rekombinationsprozesse in Halbleitern dargestellt. Neben der strahlenden Bandlückenrekombination (a) sind strahlende Rekombinationen über Donator- und Akzeptorbänder (b, c, d) möglich. Über energetisch tiefe Störstellen (e) bzw. Quencher kann auch eine nicht strahlende Rekombination erfolgen (25).

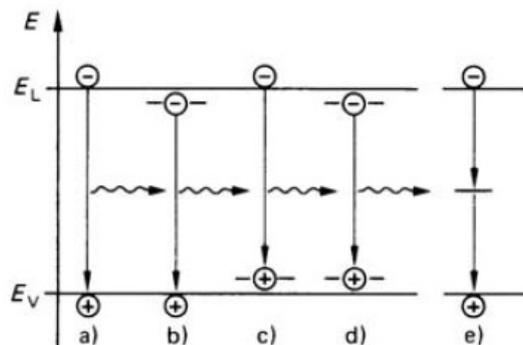


Abbildung 21: Rekombinationsprozess in Halbleitern. strahlend: a) Band-Band, b) Donator-Valenzband, c) Leitungsband-Akzeptor, d) Paar-Übergang; nichtstrahlend: e) über energetisch tiefe Störstellen bzw. Quencher; Quelle: (25)

Das Konfigurationskoordinaten-Diagramm wird für Systeme, bei denen das angeregte Elektron das Atom oder Molekül nicht verlässt, wie beispielsweise im Fall von eingebauten Übergangsmetallionen, verwendet und soll im Folgenden näher erörtert werden.

Beim Energie-Konfigurationskoordinaten-Diagramm werden Energien möglicher elektronischer Zustände in Abhängigkeit einer Ortskoordinate Q aufgetragen und als Potentialkurven dargestellt. In der schematischen Darstellung in Abbildung 22 sind der Grundzustand bei Q_0 und ein angeregter Zustand bei Q_0' eines vibronischen Festkörpers abgebildet und beschreibt beispielsweise den totalsymmetrischen Atmungsmodus einer oktaedrischen Koordination.

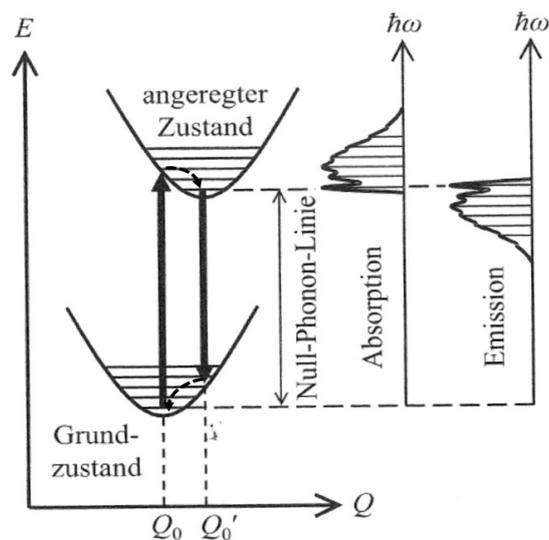


Abbildung 22: Konfigurationskoordinaten-Diagramm für den Grundzustand und einen angeregten Zustand eines vibronischen Festkörpers; Quelle: (41), adaptiert

Der Absorptionsübergang beginnt im tiefsten Vibrations- bzw. Schwingungsniveau des Grundzustandes und ein Elektron wird durch Absorption eines Photons in den erlaubten angeregten Zustand gehoben. Wird bei der Anregung das Gitter in Schwingung versetzt, so wird wie dargestellt die Gleichgewichtslage des angeregten Zustandes gegenüber dem Grundzustand verschoben. Nach einer nicht strahlenden Relaxation, die im Englischen auch als „internal conversion (IC)“ bezeichnet wird, gelangt das Elektron über Vibrationsniveaus des angeregten Zustandes auf sein tiefstes Niveau und rekombiniert durch Abgabe eines Photons wieder auf ein Vibrationsniveau des Grundzustandes. Wiederum über nicht strahlende Relaxation gelangt es auf das tiefste Niveau des Grundzustands. Die Relaxation und strahlende Rekombination erfolgt sehr rasch und beschreibt im Wesentlichen den Fluoreszenzvorgang. Die Intensitäten dieser sogenannten vibronischen Übergänge werden durch das Frank-Condon-Prinzip geprägt. Werden keine Gitterschwingungen angeregt, so entspricht die Emissions- der Absorptionsenergie und wird auch als Null-Phonon-Linie bezeichnet. Schneiden sich die Parabelkurven in einem Punkt gleicher Energie, so rekombiniert das Elektron strahlungslos in den Grundzustand bzw. einen tiefer gelegenen angeregten Zustand (40), (44).

Bei Festkörpern sind die Lumineszenzspektren, infolge von Wechselwirkungen mit der Gitterschwingung, nicht diskret aufgelöst und man beobachtet als Bandenform die Einhüllende. Als Beispiel sind dazu in Abbildung 23 die Anregungs- und Lumineszenzspektrum von Saphir ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$) abgebildet. Ti^{3+} ist ein $3d^1$ -Jon mit einem Elektron in der äußersten Schale. Durch den kubischen Anteil des Kristallfeldes ergibt sich

zu dieser Elektronenkonfiguration der Grundzustand 2T_2 und der angeregte Zustand 2E . Ausgehend vom zuvor beschriebenen und in Abbildung 22 dargestellten Modell lassen sich die Spektren gut ableiten, wobei das Ti^{3+} -Ion als sogenannter „Aktivator“ wirkt. Die Konzentration, bei der es zu Lumineszenz kommt, ist mit 0,1 bis 1 % sehr gering. Höhere Konzentrationen können die Lumineszenz verhindern und man spricht im Englischen dann von „concentration quenching“ (40), (26).

Die Verschiebung des Lumineszenz- bzw. Emissionsspektrums gegenüber dem Absorptionsspektrum zu kleineren Energien hin wird als Stokes-Shift bezeichnet. In der Praxis wird die Differenz $\lambda_{A,max} - \lambda_{L,max}$ häufig zur numerischen Beschreibung der Stokes-Shift verwendet (45). Die Anregung für Lumineszenz im sichtbaren Bereich erfolgt vorzugsweise mit UV-Strahlung oder, wie im in Abbildung 23 dargestellten Fall, mit Licht im unteren sichtbaren Bereich. Die Spektren können zumeist über die Lage der Maxima $\lambda_{A,max}$ und $\lambda_{L,max}$ sowie deren Halbwertsbreiten $\Delta\lambda_{A,50\%}$ und $\Delta\lambda_{L,50\%}$ charakterisiert werden.

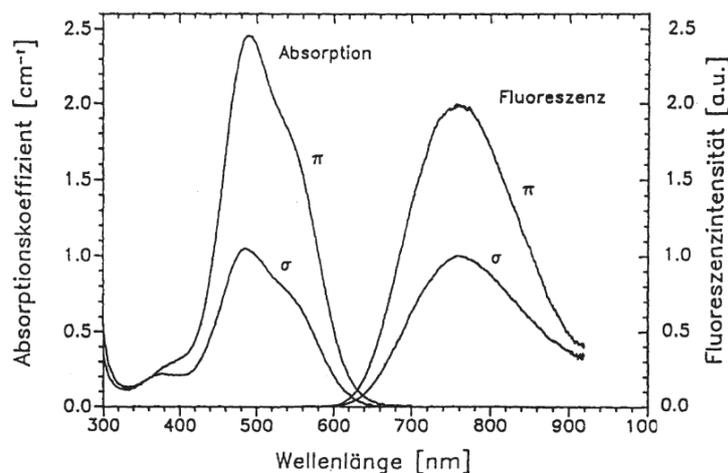


Abbildung 23: Anregungs- und Lumineszenzspektrum eines blauen Saphirs ($Al_2O_3:Ti^{3+}$) von parallel (π) und senkrecht (σ) zur z-Achse polarisiertem Licht; Quelle: (26)

Für den Saphirkristall ergibt sich aus den π -Spektren $\lambda_{A,max} \sim 480$ nm mit $\Delta\lambda_{A,50\%} \sim 140$ nm und $\lambda_{L,max} \sim 790$ nm mit $\Delta\lambda_{L,50\%} \sim 210$ nm. Die Stokes-Shift $\lambda_{A,max} - \lambda_{L,max}$ beträgt 310 nm. Diese Art der Kennwertbeschreibung ist auch durchaus sinnvoll in Hinblick auf eine Nutzung für die sensorgestützte Sortierung.

In Abbildung 24 ist das Tanabe-Sugano-Diagramm in Kombination mit dem Konfigurationskoordinaten-Diagramm für den Rubinkristall als weiteres Beispiel dargestellt.

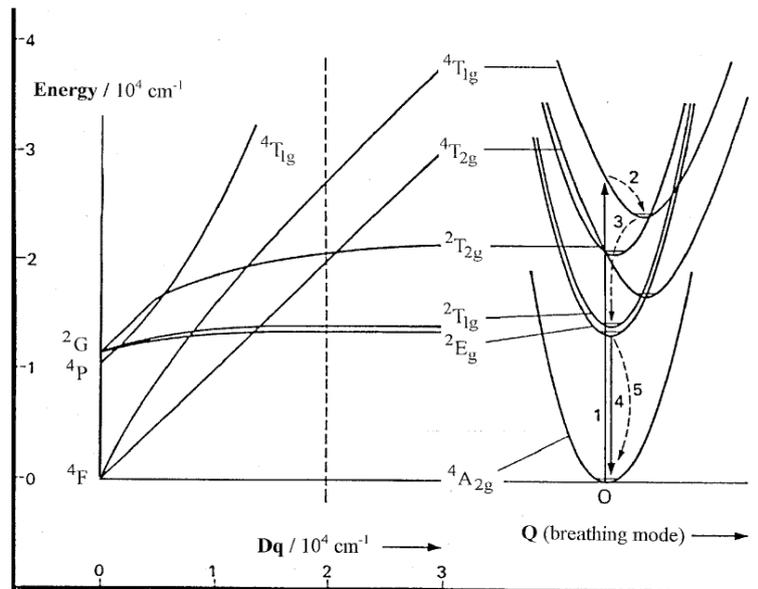


Abbildung 24: Kombiniertes Diagramm für den Rubinkristall ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$); Quelle: (46), adaptiert

Die Anregung erfolgt über die Übergänge $4A_2 \rightarrow 4T_1$ (1). Durch nicht strahlende Relaxation (2) gelangt das Elektron in den vibronischen tiefsten Zustand von $4T_1$. Mittels eines strahlungslosen Systemübergangs (3) auf $2T_1$ und thermischer Energieübertragung auf das Gitter gelangt das Elektron auf den Zustand $2E$ ungleicher Spin-Multiplizität. Die strahlungslosen Übergänge zwischen den Potentialtöpfen werden im Englischen auch als „inter system crossing (ISC)“ bezeichnet. Im Fall des Rubins führen diese nicht-strahlenden Übergänge letztlich in den ersten angeregten Zustand $2E_g$ über dem Grundzustand. Weil dessen Potentialtopf mit den Grundzustandstopf nicht überschneidet, ist von dort aus strahlungslose Relaxation (5) sehr unwahrscheinlich. Der bevorzugte weitere Abbau der Anregungsenergie ist die Emission (4) eines Photons. Strahlende Rekombinationen dieser Art sind verzögert und beschreiben im Wesentlichen die Phosphoreszenz. (26), (39).

Für den beschriebenen Rubinkristall liegt, wie in Abbildung 25 dargestellt, der Lumineszenzübergang $\lambda_{L,\max}$ bei 694 nm bzw. 14.400 cm^{-1} und erscheint intensiv rot. Im Unterschied zum Saphir beträgt die Halbwertsbreite $\Delta\lambda_{L,50\%}$ nur wenige Nanometer und die Emission ist also nahezu monochromatisch.

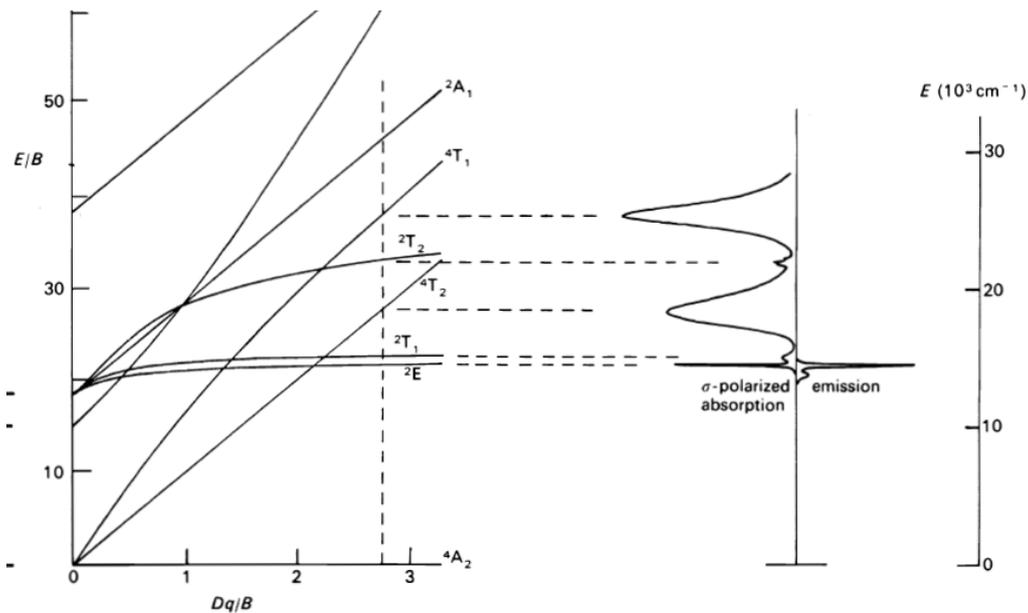


Abbildung 25: Absorptions- und Lumineszenzspektrum von Rubin ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$); Quelle: (46)

Die strahlende Rekombination steht in Konkurrenz zur nicht strahlenden Rekombination. In die Quantenausbeute QE nach (4.18) - als das Verhältnis emittierter Photonen N_e zu absorbierten Photonen N_a - geht diese Konkurrenzsituation über die Lebensdauer τ_S und τ_{NS} [s] ein.

$$QE = \frac{N_e}{N_a} = \frac{1}{1 - \frac{\tau_S}{\tau_{NS}}} * 100\% \quad (4.18)$$

Für eine effiziente Lumineszenzanregung ist es erforderlich, dass die Lebensdauer der strahlenden Rekombination τ_S wesentlich kürzer ist als jene für die nicht strahlende Rekombination τ_{NS} (41).

Die Lumineszenz kann insbesondere durch Rekombinationszentren bzw. „Quencher“ stark geschwächt oder sogar ausgelöscht werden. Quencher sind eingebaute Übergangsmetallionen wie Fe^{3+} , Fe^{2+} , Co^{2+} oder Cu^{2+} mit Ladungsübertragungsbanden im UV-Bereich und steilen Flanken die in den sichtbaren Spektralbereich reichen. Siehe dazu auch 4.4.3.4. Durch Übertragung der Anregungsenergie vom Aktivator auf den Quencher und strahlender Rekombination im IR-Bereich wird die Lumineszenz gelöscht. Gleiche Ionenarten können je nach kristalliner Konfiguration beide Funktionen übernehmen. Da die genannten Übergangsmetallionen wichtige Komponenten weitverbreiteter Minerale sind, lumineszieren viele Minerale nicht (45), (40).

4.5 Detektion

Die Funktion von Detektoren zur Messung von sichtbarem Licht und angrenzender Wellenlängenbereiche basiert auf der Photodiode, bei der durch den inneren photoelektrischen Effekt ein der Strahlungsintensität proportionaler Strom erzeugt wird. An der Grenzzone bzw. Raumladungszone eines pn-Halbleiterkontakts, welche in Abbildung 26 schematisch dargestellt ist, wird ein Elektron dabei aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben indem es die Energie eines Photons aufnimmt.

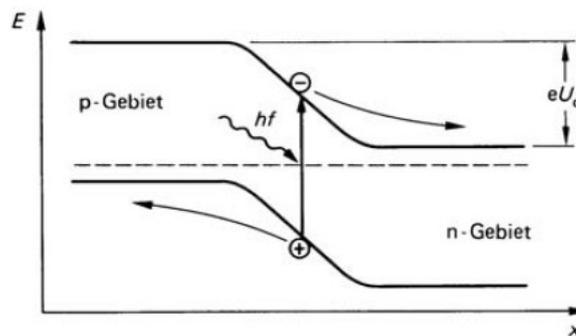


Abbildung 26: Bandschema einer Photodiode ohne äußere Spannung. Die Lage der Fermi-Energie ist gestrichelt gezeichnet; Quelle:(25)

Die Energie des Photons muss dazu mindestens so groß wie die Bindungsenergie des Elektrons sein. Siehe dazu auch Absatz 4.4.3. Das so erzeugte Elektron-Loch-Paar wird aufgrund des eingebauten Feldes getrennt. Das Elektron wird auf die n-Seite, das Loch auf die p-Seite befördert. Im Außenkreis der Diode fließt pro getrennten Elektron-Loch-Paar genau eine Elementarladung e mit dem Wert $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Bei Bestrahlung mit dem Photonenfluss \dot{N}_{photon} [1/s] bzw. der Strahlungsleistung Φ_e [W] fließt nach (4.19) der Photostrom I_{ph}^* [A] (25).

$$I_{ph}^* = \dot{N}_{\text{photon}} * e = \frac{\Phi_e}{E_{\text{photon}}} * e \quad (4.19)$$

In realen Strukturen trägt nicht jedes Photon zu einem nachweisbaren Elektron-Loch-Paar bei. Dringen etwa Photonen weit entfernt von der Raumladungszone in das Material ein, dann werden die gebildeten Elektron-Loch-Paare durch Rekombination verschwinden, ehe sie nachgewiesen sind. Der tatsächliche Photostrom I_{ph} einer Diode, der die Richtung eines Sperrstroms hat, reduziert sich damit nach (4.20) um den Faktor $\eta(\lambda)$ ($\eta < 1$), der ebenfalls als Quantenausbeute bezeichnet wird. Wobei in diesem Zusammenhang das Verhältnis von nachgewiesenen Elektronen zu eingestrahlenen Photonen ausgedrückt wird. Der Photostrom

ist die interessanteste Größe zum Nachweis elektromagnetischer Strahlung, denn er ist nach (4.20) proportional zur Strahlungsleistung (25).

$$I_{ph} = \frac{\Phi_e}{E_{photon}} * e * \eta(\lambda) \quad (4.20)$$

Photodioden werden aus unterschiedlichen Halbleiterwerkstoffen hergestellt und sind insbesondere durch deren spektrale Empfindlichkeit $SR(\lambda)$ [A/W] nach (4.21) charakterisiert.

$$SR(\lambda) = \frac{I_{ph}}{\Phi_e} = \frac{e * \eta(\lambda)}{E_{ph}} \quad (4.21)$$

In Abbildung 27 ist die Empfindlichkeit über die Wellenlänge für Photodioden aus Si, Ge und $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ dargestellt. Die Gerade entspricht einer idealen Photodiode mit Quantenausbeute $\eta(\lambda) = 100\%$ (25).

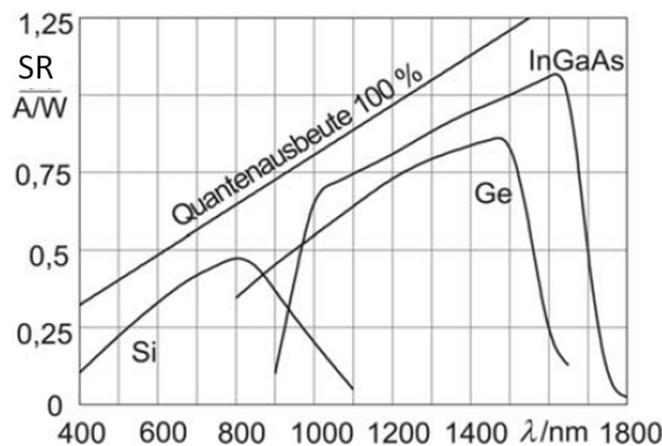


Abbildung 27: Spektrale Empfindlichkeit SR für Fotodioden aus Si, Ge und $In_{0,53}Ga_{0,47}As$; Quelle: (25)

Generell kann mit photodioden-basierten Sensoren bei transparenten und nicht lumineszierenden Proben bzw. Festkörpern die Transmissionsintensität gemessen werden. Ist die Probe nicht transparent oder tritt Lumineszenz auf, kann die Reflexionsintensität gemessen werden. Bei Bedarf kann in Absorptionsdaten oder, sofern spektralaufgelöst, in Absorptionsspektren umgerechnet werden. Auf die für die sensorgestützte Sortierung relevanten Ausführungsvarianten und Eigenschaften wird im Detail in Kapitel 5 unter 5.3.2.2 näher eingegangen.

5 Stand der Technik – optische Sortierung

Der Ausdruck „Sensorgestützte Sortierung“ hat sich in der Fachwelt sowie Literatur als Sammelbegriff für Trennaggregate mit kontaktloser sensorischer Merkmalsklassenerkennung und automatisierter klassenspezifischer Trennung eines stückigen Materialstromes etabliert. Zum Ausdruck bringt dies auch der Titel und Inhalt der etablierten und seit 2004 zweijährig in Aachen veranstaltete Fachtagung „Sensor-based Sorting“ (47). Für die spezifischen Ausrüstungsvarianten findet man aber sehr unterschiedliche Bezeichnungen. Dies ist oftmals historisch bedingt oder geprägt seitens der Maschinenhersteller und/oder des Einsatzgebietes. Dies gilt insbesondere für optische Sortierer für die Benennungen wie Farbsortierer, farb-basierte Sortierer, VIS-Sortierer, optoelektronischer Sortierer, Farb- oder Fotoausleser oder Laser-Sortierer die in der Fachwelt und Literatur gebraucht werden. Dessen sollte man sich bewusst sein und insbesondere bei technischen Recherchen oder Schutzrechtsrecherchen zu diesem Thema die Suchbegriffe entsprechend definieren.

In der Regel wird das Attribut „optisch“ für sensorgestützte Sortiersysteme verwendet, die mit sichtbarem Licht im klassischen Sinne arbeiten und wie das menschliche Auge im Bereich von 380 nm bis 780 nm des elektromagnetischen Spektrums oder Teilbereichen davon detektieren. Obwohl der Begriff „Farbe“ definitionsgemäß mit dem menschlichen Sinneseindruck verknüpft ist (48), wird bei der Aufnahme mit nichtnormierten Messsystemen wie etwa optischen Sortiersystemen meistens auch von Farberkennung gesprochen. Unter diesem Hintergrund wird der Begriff „Farbe“ in dieser Arbeit ebenso in Zusammenhang mit der optischen bzw. VIS-basierten Sortierung verwendet.

Eine Einteilung und Diskussion der sensorgestützten, insbesondere der optischen Sortierung, kann entsprechend dem Einsatz bzw. der Trennaufgabe oder anhand der wesentlichen Baugruppen und deren gängigen technologischen Kenndaten sowie Ausführungsformen erfolgen. Nach letzterem Schema soll in dieser Arbeit die historische Entwicklung und der Stand der Technik allgemein und insbesondere der optischen Sortierung beschrieben werden. Ergänzend wird anhand von wesentlichen Einsatzfeldern mit Bezug auf die Firma Binder+Co AG die aufbereitungstechnische Relevanz für die Sekundär- und Primärrohstoffaufbereitung dargestellt. Obwohl wie bereits erwähnt im Lebensmittelbereich optische Sortierung schon sehr lange und in großen Stückzahlen im Einsatz ist, wird darauf in dieser Arbeit nicht speziell eingegangen. Die technologischen Grundlagen gelten aber natürlich auch für den Einsatz in diesem Bereich.

5.1 Prozesseinbindung und Zielsetzung für den Einsatz sensorgestützter Sortierer

In allen Einsatzfällen sind die wesentlichen Zielsetzungen entweder die An- und Abreicherung von Stoffströmen zur Herstellung von Wertstoffkonzentration oder die Abtrennung von oft wenigen Störstoff- und Fremtteilen zur Sicherung der Produktqualität und/oder Produktionsabläufe zuzuordnen.

Bei der Aufbereitung von Industriemineralen und Erzen werden sensorgestützte Sortierer sehr häufig vor/am Beginn des eigentlichen Aufbereitungsprozesses zur Bergevorabscheidung eingesetzt. Die Herstellung von Vorkonzentraten im Prozess für nachfolgende Aufbereitungsschritte oder die Endproduktqualitätserzeugung ist noch eher selten.

In der Lebensmittelverarbeitung wird sensorgestützte Sortierung in allen Prozessphasen eingesetzt. Vor allem unreife, kranke oder störende Fruchtteile wie Schalenfragmente und Stängel oder Fremdkörper wie Insekten und Steine werden aussortiert. Aber auch die Qualitätsklassensortierung kommt häufig und vermehrt zur Anwendung.

Im Recyclingbereich wird die sensorgestützte Sortierung über die gesamte Aufbereitungskette in großer Anzahl und verschiedenster Ausprägung eingesetzt. Die Trennaufgaben reichen von Vorabscheidung über die Grobtrennung bis hin zur Endproduktqualitätserzeugung. Dies ist möglich, da sekundäre Rohstoffe überwiegend grobverwachsen sind und die vorkommenden Wertstoffe konzentriert vorliegen sowie bekannt sind.

5.1.1 Kenngrößen

Im Wesentlichen kann ein Sortierer durch Betriebskenngrößen, welche direkt die Zusammensetzung der erzeugten Trennfraktionen beeinflussen wie

- Abscheidegrad AG ,
- Wertstoffverlust WV und
- Übersortierung $ÜS$

sowie ökonomische Betriebskenngrößen wie

- Durchsatz Q ,
- Trennkapazität AW_{max} und
- Druckluftverbrauch Q_p beschrieben werden.

Diese Kenngrößen müssen zumeist über applikationsspezifische Versuche ermittelt oder können aus Erfahrungswerten für die jeweilige Systempaarung Aufgabegut/Sortiergerät abgeleitet werden. Wie bei technischen Entwicklungsprozessen üblich, kann auch bei der sensorgestützten Sortierung von einer Abweichung der Anlagenergebnisse zu Laborversuchen ausgegangen werden und ist bei der Auswahl der Technik und Verfahrensvariante sowie der Wirk- und Ergebnisprognose zu berücksichtigen. Basis für die Prognosen und Bewertung realer Prozesse ist die Fraktionsanalyse und Bilanzrechnung. Zunehmend werden dazu auch softwaregestützte Simulationsverfahren, beispielsweise auf Excel basierend oder spezifische Prozesssimulationssoftware wie IDEAS® von der Firma Andritz AG, eingesetzt. Neben der Modelstruktur ist die Kenntnis der Betriebskenngrößen für möglichst viele Systempaarvariationen und relevante Merkmalbereiche essentiell. Die systematische Abbildung von Versuchsergebnissen und Erfahrungswerten ist heutzutage Basis für die Prozessauslegung.

5.1.1.1 Bilanzrechnung

Der technologische Erfolg von Trennvorgängen, wie in Abbildung 28 dargestellt, lässt sich über die Bilanzrechnung darstellen (49). Aus den Fraktionseigenschaften bzw. Eigenschaftsänderungen kann auch der Abscheidegrad und die Übersortierung ermittelt werden.



Abbildung 28: Stoffstromverzweigung für kontinuierlichen Mehrfraktionen-Trennprozess

Die Betrachtung sei auf die Trennung von festen Schüttgutfraktionen beschränkt, deren Chemismus nicht verändert wird. Das Aufgabegut setzt sich aus einer endlichen Anzahl von Wertstoff- bzw. Materialklassen mit den Gehalten $g_{i,0}$, [%], welche durch physikalische,

insbesondere optische Eigenschaften hinreichend unterscheidbar sind. Für die weiteren Ausführungen gelten folgende Indexvereinbarungen:

- $i...$ Stoffindex, $i \in [1...N]$
- $j...$ Fraktionsindex, $j \in [1...L]$
- $0...$ Aufgabegutindex

Das Masseausbringen $r_{m,j}$ [%] nach (5.1) gibt an, welcher Masseanteil der Aufgabe als Trennfraction ausgebracht wurde. Für diskontinuierliche Prozesse sei \dot{M} [kg/h] $\triangleq m$ [kg].

$$r_{m,j} = \frac{\dot{M}_j}{\dot{M}_0} * 100\% = \frac{m_j}{m_0} * 100\% \quad (5.1)$$

Der Gehalt $g_{i,j}$ [%] entsprechend (5.2) gibt an, wie hoch der Anteil eines Stoffes in einer Aufgabefraction oder beliebigen Trennfraction ist. Auf Wertstoffe bezogen, spricht man auch oftmals von der Reinheit einer Trennfraction oder eines Konzentrats.

$$g_{i,j} = \frac{\dot{M}_{i,j}}{\dot{M}_j} * 100\% = \frac{m_{i,j}}{m_j} * 100\% \quad (5.2)$$

Das Inhaltsausbringen $r_{i,j}$ [%] nach (5.3) bzw. (5.4) gibt an, welcher Anteil des im Aufgabegut enthaltenen Stoffes i in eine Trennfraction j ausgebracht wurde. Wobei $I_{i,j}$ [%] nach (5.5) als Inhaltseinheit bezeichnet wird.

$$r_{i,j} = \frac{\dot{M}_j * g_{i,j}}{\dot{M}_0 * g_{i,0}} * 100\% = r_{m,j} * \frac{g_{i,j}}{g_{i,0}} \quad (5.3)$$

$$r_{i,j} = \frac{I_{i,j}}{I_{i,0}} * 100\% \quad (5.4)$$

$$I_{i,j} = r_{m,j} * g_{i,j} \quad (5.5)$$

Desweiteren gelten die Erhaltungssätze nach (5.6).

$$\sum_{j=1}^L \dot{M}_j = \dot{M}_0 \quad \text{und} \quad \sum_{j=1}^{L,N} I_{i,j} = I_{i,0} \quad (5.6)$$

5.1.1.2 Systembeschreibende Kennwerte

Es soll nun versucht werden die häufig zur Systembeschreibung und für die Simulation verwendeten Begriffe wie Abscheidegrad, Übersortierung und Wertstoffverlust mit der Bilanzrechnung zu verknüpfen. Im Wesentlichen bezieht man sich auf einzelne Trennfractionen und der logistischen und verfahrenstechnischen Stoff- bzw. Merkmalsklassenzuordnung (50). Für die weiteren Ausführungen gelten folgende Indexvereinbarungen:

SC.... (sorted correct) Index für logistisch richtig sortierte Stoffe, $SC \in [1...N]$

SW.... (sorted wrong) Index für logistisch falsch sortierte Stoffe, $SW \in [1...N]$

TF.... (target fraction) Trennfraction, auf die sich die Auswertung bezieht, $TF \in [1...L]$

k... Stoffindex $k \in [1...N]$, $k \neq SC$

Abscheidegrad:

Der Abscheidegrad AG oder η [%] nach (5.7) bezieht sich üblicherweise auf das Inhaltsausbringen eines Stoffes in jene Trennfraction, in die dieser logistisch ausgebracht werden soll (50).

$$AG = \eta_{SC,TF} = \frac{I_{SC,TF}}{I_{SC,0}} * 100\% \quad (5.7)$$

Er ist mit der verfahrenstechnischen Stoffzuordnung verknüpft, welche bei sensorgestützten und optischen Sortierern programmtechnisch zumeist einfach umgestellt werden. Moderne Sortierer zeichnet diese Flexibilität aus und kann auch für bestimmte Prozesskonstellationen als Vorteil gegenüber klassischen Trennverfahren angesehen werden.

Wertstoffverlust:

Für den Wertstoff- bzw. Stoffverlust WV [%] nach (5.8) konnte keine allgemein gültige Definition gefunden werden. Diese ist aber herkömmlicherweise ebenso mit der beabsichtigten logistischen Stoffzuordnung verknüpft und bezieht sich zumeist auf den Wertstoffabgang bzw. den Inhaltsanteil des Wertstoffes, der in logistisch falschen Trennfractionen landet.

$$WV = \frac{I_{SC,0} - I_{SC,TF}}{I_{SC,0}} * 100\% = (1 - \eta_{SC,TF}) * 100\% \quad (5.8)$$

Übersortierung:

Für die Über- bzw. Fehlsortierung $\dot{U}S$ [%] nach (5.9) konnte ebenfalls keine allgemein gültige Definition gefunden werden. Diese ist aber ebenfalls mit der beabsichtigten logistischen Stoffzuordnung verknüpft und bezieht sich zumeist allgemein auf Stoff- bzw. Inhaltsanteile, die fälschlicherweise aktiv oder passiv mit aussortiert wurden.

$$\dot{U}S = \eta_{SW,TE} = \frac{\sum_k I_{k,TF}}{\sum_k I_{k,0}} * 100\% \quad (5.9)$$

Möglich ist auch den Trennerfolg über den **Trennungsgrad** bzw. die Sortiergüte zu beschreiben. In Anlehnung an Schubert (49) ergibt sich dieser nach (5.10) aus der Differenz von Abscheidegrad und Übersortierung.

$$\eta_T = AG - \dot{U}S = \eta_{SC,TF} - \eta_{SW,TF} \quad (5.10)$$

Ein perfektes Trennergebnis ergibt nach dieser Definition den Wert 1 bzw. 100 %. Zu bedenken ist, dass Werte <1 bzw. <100 % durch verschiedenste Wertekombinationen erfüllt werden können und daher so ermittelte Trennungsgrade nur bedingt aussagekräftig sind (49).

Durchsatz:

Der Durchsatz Q wird üblicherweise als Massenstrom \dot{M} [t/h] und selten als Volumenstrom \dot{V} [m³/h] angegeben. Der Durchsatz von sensorgestützten Sortierern variiert stark und reicht je nach Bauart und Aufgabeguteigenschaft, insbesondere in Bezug auf Korngröße, Kornform und Dichte, von einigen hundert Kilogramm bis weit über hundert Tonnen je Stunde. Zur besseren Vergleichbarkeit wird der Durchsatz häufig in Bezug auf die aktive Sortierbreite in [t/hm] angegeben. Als einfach zu ermittelnde Kenngröße kann die Flächendichte ρ_F [kg/m²] zur rechnerischen Bestimmung des zulässigen Durchsatzes herangezogen werden.

$$\dot{M} = \rho_F * v * k_{bed} * 3,6 \quad (5.11)$$

Beispielsweise ergibt sich für Quarzkies 10/25 mm mit ρ_F von 18,2 kg/m², einer mittleren Transportgeschwindigkeit von v von 1,5 m/s und einem Bedeckungsfaktor k_{bed} von 0,25 ein Durchsatz von 24,6 t/hm.

Zur Orientierung sind in Tabelle 8 Durchsätze für verschiedene Aufgabegutfraktionen aus der Sekundär- und Primärrohstoffaufbereitung beispielhaft angegeben.

| Material | Korngröße [mm] | Durchsatz [t/hm] | Material | Korngröße [mm] | Durchsatz [t/hm] |
|------------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|
| Glasscherben | 2-4 | 2,2 | Steinsalz | 1,4-4 | 4 |
| | 4-8 | 6 | | 5-8 | 10 |
| | 8-25 | 11 | | 8-20 | 16 |
| | 25-60 | 15 | Quarz | 10-20 | 25 |
| Kunststoff-Flake | 4-12 | 0,5 | | 20-60 | 45 |
| Kunststoff-EAG | 20-50 | 1 | | 40-110 | 115 |
| Kunststoff-HK | 60-300 | 1,2 | Talk | 7-12 | 19 |
| Papier/Karton | 100-500 | 4 | | 12-25 | 28 |
| Kupfergranulat | 2-4 | 7,5 | | 25-50 | 40 |
| Bauschutt | 5-16 | 13 | Kalkstein | 8-16 | 15 |
| | 16-32 | 28 | | 16-32 | 34 |
| | 32-70 | 48 | Magnesit | 5-20 | 17 |
| Polysilizium | 10-30 | 11 | | 20-40 | 41 |
| | 30-65 | 26 | Schmelzmagnesia | 5-10 | 9 |

Tabelle 8: Durchsatz für diverse Applikationen

Aus der Literatur bekannt (51) und durch Versuche bestätigt, soll das Korngrößenverhältnis < 3 und die Belegungsdichte in der Detektionszone $< 40\%$ betragen. Diese Rahmenbedingungen liegen auch den Werten in Tabelle 8 zu Grunde.

Trennkapazität:

Die Trennkapazität AW_{max} [t/h] gibt jene Abweisemenge bzw. jenes Masseausbringen an bis zu der, bei Einhaltung der spezifizierten Aufgabeguteigenschaften und –menge, die Qualitätsparameter garantiert werden können. Je mehr Objekte aktiv, insbesondere pneumatisch, ausgetragen werden müssen, desto stärker werden die Turbulenzen im Trennraum. Dies führt zu einer Reduktion des Abscheidegrades und Erhöhung der Fehlsortierung bis hin zum Systemzusammenbruch bzw. zum Zusammenbruch der Druckluftversorgung. Bei hohen Masseausbringen und/oder spezifischen Sortieraufgaben kann es daher sein, dass die in Tabelle 8 angeben Durchsätze nicht erreicht werden. Der Durchsatz und die Trennkapazität sind über die Qualitätsziele und Versorgungskapazität gekoppelt. Sortiersysteme werden üblicherweise derart ausgelegt, dass der nominale Durchsatz und die Fraktionsqualität für Massenausbringung von bis zu ca. 30 % stabil sind.

Druckluftverbrauch:

Für die ökonomische Einsatzbewertung von Sortieren mit pneumatischer Trennung und für den Vergleich mit alternativen Aufbereitungsschritten ist zumeist der austragsmengenbezogene Druckluftbedarf Q_p [Nm³/t] entscheidend. Vor allem bei hohem Massenausbringen definiert der Druckluftverbrauch die Trennkosten, da die Energiekosten für Transportaggregate und Sensorik nahezu konstant und vergleichsweise gering sind. Dieser Kennwert ist im Wesentlichen abhängig von der eingesetzten Ventiltechnik und Impulsrate. Grundsätzlich steigt der Druckluftbedarf mit kleinerer Sortierkorngröße. Neben der Korngröße beeinflusst auch die individuelle Einsatzsituation selbst die Impulsrate bzw. den Druckluftbedarf. Dieser kann stark variiert und liegt beispielsweise bei der Altglassortierung zwischen 30 bis 130 Nm³/t. Siehe dazu auch 6.4.1. Insbesondere bei der Trennung von kleinen Kornfraktionen und geringem Produktwert, ist der Druckluftbedarf oftmals der wesentliche Entscheidungsfaktor für oder gegen einen Einsatz.

5.1.1.3 Leistungs- und Garantieparameter

In der Praxis werden die wesentlichen Garantieparameter, welche zwischen Maschinenlieferant und Anlagenbetreiber für die Evaluierung und die Abnahme der Installation vereinbart werden, aus den genannten Kennwerten abgeleitet. Zudem können produktspezifische Kennwerte und Analysewerte wie LOI, Weißegrad und/oder Gehalt von Elementen und Parameter wie Verfügbarkeit oder Standzeit von Verschleißteilen herangezogen werden.

5.1.2 Aufgabegutkonditionierung

Ausgehend von den spezifischen Rohguteigenschaften ist dem eigentlichen Sortierprozess zumeist eine gezielte Materialkonditionierung vorgelagert. Mit entsprechender Vorkonditionierung werden günstige Aufgabeguteigenschaften für die sensorgestützte Sortierung geschaffen und diese im Betrieb stabil gehalten. Mögliche Vorkonditionierungsschritte und deren wesentlichen Eigenschaftswirkungen sind in Tabelle 9 dargestellt.

| Konditionierungsschritt | Aufgabeguteigenschaft |
|------------------------------|---|
| vorsortieren | Zusammensetzung (generell) |
| brechen | Kornform, Kornverteilung, Aufschluss, Oberflächenqualität, |
| sieben | Kornverteilung, Kornform, Korngrößenspanne, Korngrenzen, Zusammensetzung, Staubbildung, |
| sichten | Kornverteilung, Zusammensetzung, Staubbildung |
| reinigen (waschen, abreiben) | Oberflächenqualität, Aufschluss, Transporteigenschaften, Staubbildung |
| trocknen | Transporteigenschaften, Oberflächenqualität |
| befeuchten | Oberflächenqualität |

Tabelle 9: Übliche Konditionierungsschritte und deren Wirkung

Die Auslegung, Gestaltung und Einsatzeffizienz von sensorgestützten Sortiertechnologien wird neben den Rohguteigenschaften wesentlich durch die Konditionierung beeinflusst. Defizite, insbesondere bei der Konditionierung oder in der ersten Funktionsphase, wie etwa lokale Objekthäufungen oder Überladungen, können kaum oder nur mit hohem Aufwand kompensiert werden. Auch wenn beispielsweise mit komplexen und rechenintensiven Bildverarbeitungsalgorithmen Objekt-Cluster aufgelöst und eine überwiegend richtige Klassifizierung der einzelnen Objekte erreicht wird, beeinflusst eine ungenügende Vereinzelung oder Lageänderungen entlang des Transportweges die physikalische Trennung stark negativ.

Unter Umständen können durch eine geschickte Prozessposition und -integration der Sortiermaschinen spezifische Konditionierungsschritte entfallen oder sich umgekehrt begünstigende Bedingungen für deren Ausrüstung ergeben. In der Praxis wird der gesamtheitlichen Betrachtung unter Einbeziehung des gesamten Aufbereitungsprozesses mehr und mehr Rechnung getragen, um so das Potential der sensorgestützten Sortierung besser zu nützen (52), (53).

Auf die beiden konzeptionell gebräuchlichen Maschinentypen und die wesentlichen eingesetzten Baugruppenttechnologien sowie deren Positionierung soll nun im Weiteren eingegangen werden.

5.2 Funktionsprinzip und Ausführungsformen

Wie bereits angemerkt, kann die Handklaubung bzw. manuelle Sortierung als Vorbild für die sensorgestützte Sortierung angesehen werden. Optische Sortierer mit VIS-Sensorik imitieren die Handklaubung sensorisch am direktesten, da sie nur den sichtbaren Wellenlängenbereich nützen. Betrachtet man die wesentlichen Baugruppen eines optischen Sortiersystems, so entspricht

- der Detektor dem Sehsinn bzw. den Augen,
- die Strahlungsquelle der Sonne bzw. der Beleuchtung,
- die Signal- und Datenauswertung dem Gehirn und
- die Trenneinheit bzw. Effektorik der Handarbeit, die die physische Objektrennung durchführt.

Diese Baugruppen sind in eine Trägerkonstruktion integriert und werden zumeist über ein Mensch-Maschine-Interface (MMI) parametrieren und kontrolliert. Mittels aktiver und passiver Förderaggregate wird kontinuierlich Schüttgut zugeführt und vereinzelt an der Sensorik und Effektorik vorbeitransportiert.

5.2.1 Funktionsmodell

Aus der Baugruppenbetrachtung kann das in Abbildung 29 dargestellte Funktionsmodell zum besseren Verständnis abgeleitet werden. Es sind darin die wesentlichen Funktionen, der Materialfluss und Informationsfluss modelliert. Alle sensorgestützten Sortiersysteme können mit diesem einfachen Modell beschrieben werden, unterscheiden sich aber in der Ausführung der Funktionselemente in Abhängigkeit der Applikation. Im industriellen Einsatz sind sensorgestützte Sortierer an den Materialflussschnittstellen und zumeist über die Parametrier- und Kontrollschnittstelle in den übergeordneten Prozess eingebunden.

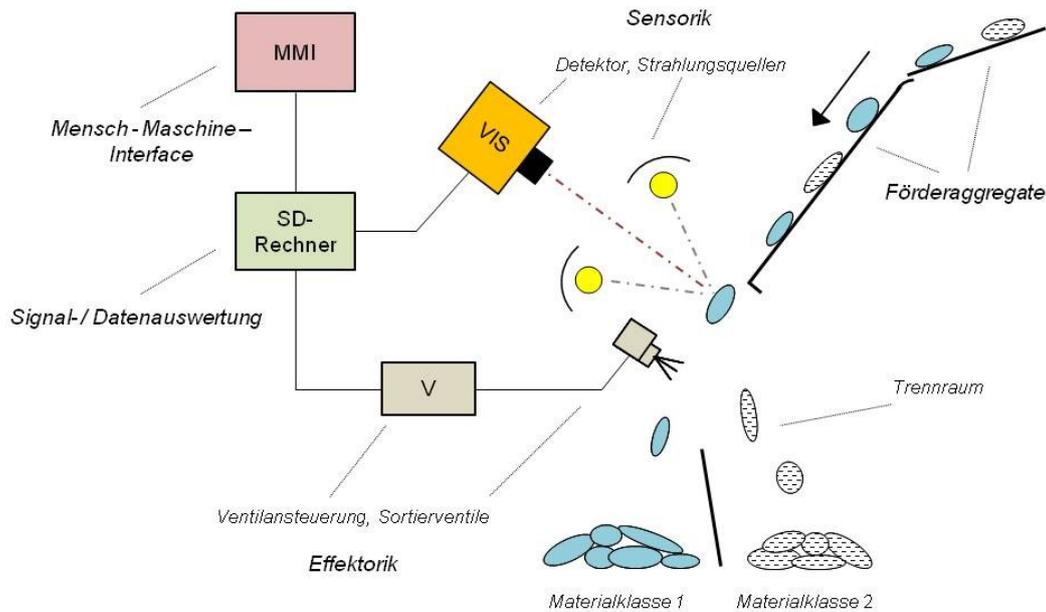


Abbildung 30: Skizze der Baugruppenanordnung - Rutschensortierer

Auf einer Vibrationsrinne wird zuerst das Aufgabegut möglichst monoschichtig vereinzelt und anschließend auf eine geneigte statische Materialrutsche aufgegeben. Auf dieser erfolgt durch die Erdbeschleunigung eine Abstandsstreckung zwischen den Objekten und eine weitere Vereinzelnung sowie Führung der Objekte. Im unteren Bereich, oder wie in der Skizze dargestellt nach der Rutsche, sind die Detektor- und Beleuchtungskomponenten, die zusammen das sogenannte Sensorsystem bzw. die Sensorik bilden, angeordnet. Die Sensorik misst die optischen Eigenschaften bzw. Oberflächenfarbe der Objekte. Die optischen Eigenschaften werden digitalisiert und durch die Signal- und Datenauswertung weiter aufbereitet. Letztlich werden die einzelnen Objekte nach ihren Eigenschaften definierten Merkmalsklassen zugeordnet bzw. klassifiziert. Auf Basis der Klassenzuordnung und Parametrierung werden die nachgelagerten Druckluft- bzw. Sortierventile orts- und zeitrichtig über den Verstärker gesteuert und das Aufgabegut in mindestens zwei Produktströme getrennt. Der elektronische Verstärker und die Aktuatoren, wie Sortierventile oder Klappenelemente, werden zusammen häufig als Effektorik bezeichnet.

Als generelle Vorteile des Rutschensortierers kann seine kompakte einfache Bauform und die meist geringeren Herstellungs- und Betriebskosten der Förderaggregate genannt werden. Auch die sehr große Auswahl an möglichen Rutschenwerkstoffen ist für manche Aufgabenstellungen vorteilhaft oder sogar essentiell.

Als wesentlicher Nachteil ist die verhältnismäßig große statistische Variation der Bewegungsvektoren (Richtung und Geschwindigkeit) der Einzelobjekte während der

Detektions-, Klassifizierungs- und Trennphase zu nennen. Die Bewegungsrichtung, Beschleunigung und Geschwindigkeit des Materialstroms bzw. des Kollektives ist zwar bekannt bzw. ermittelbar, die der Einzelobjekte aber nur bedingt.

Die wesentlichen Einflussgrößen auf den kollektiven und individuellen Bewegungsvektor sind

- Neigungswinkel der Rutsche,
- Länge der Rutschen,
- Objektanfangsgeschwindigkeit,
- Kornform,
- Homogenität der Kornform und
- Reib- und Gleitwert.

Der Reib- und Gleitwert werden ihrerseits wieder vom Rutschenwerkstoff, der Aufgabegutart selbst, oberflächlichen Anhaftungen und dem Feuchtegehalt beeinflusst. Eine örtliche und zeitliche Lageprognose ist mit einer gewissen Unschärfe verbunden und limitiert insbesondere den Wirkungsgrad der physischen Trennphase.

Da die Objekte auch während der Detektionsphase durch die Erdgravitation beschleunigt werden, ergeben sich für bestimmte Detektorarten, wie Trilinear- und TDI-Zeilensensoren systematische Abbildungsfehler. Dies kann die Detektorauswahl unter Umständen einschränken.

Üblicherweise wird die Konstruktion dermaßen gestaltet, dass sich eine mittlere Geschwindigkeit von 1,5 bis 2,5 m/s am Detektionspunkt ergibt. Analysen haben etwa für Altglasfraktionen eine Variation der Einzelobjektgeschwindigkeit von +/- 10 % ergeben. Die aktive Sortierbreite industriell eingesetzter Rutschensortierer beträgt zwischen 500 mm bis 2.000 mm.

5.2.2.2 Bandsortierer

Der beispielhafte Aufbau eines optischen Bandsortierers mit VIS-Kamera und Lumineszenzröhren als Strahlungsquellen ist schematisch mit seinen Hauptkomponenten in Abbildung 31 dargestellt. Bandsortierer dieser Art werden bevorzugt zur Sortierung von Sekundärrohstoffen geringer Schüttdichte wie Kunststoffhohlkörpern, Folien und Altpapier eingesetzt. Zudem kommt der Bandsortierer zum Einsatz, wenn spezifische

Aufgabeguteigenschaften dem Einsatz eines Rutschensortierers entgegenstehen und etwa eine Trocknung zur Vorkonditionierung und Stabilisierung der Rutsch- und Gleiteigenschaften aus wirtschaftlichen oder erkenntnistechischen Gründen nicht möglich ist. Beispielsweise können so oberflächenbenetzte mineralische Feinkornfraktionen auch unter 10 mm gut sortiert werden. Der Funktionsablauf ist ähnlich dem des Rutschsortierers und wie in 5.2.2.1 beschrieben.

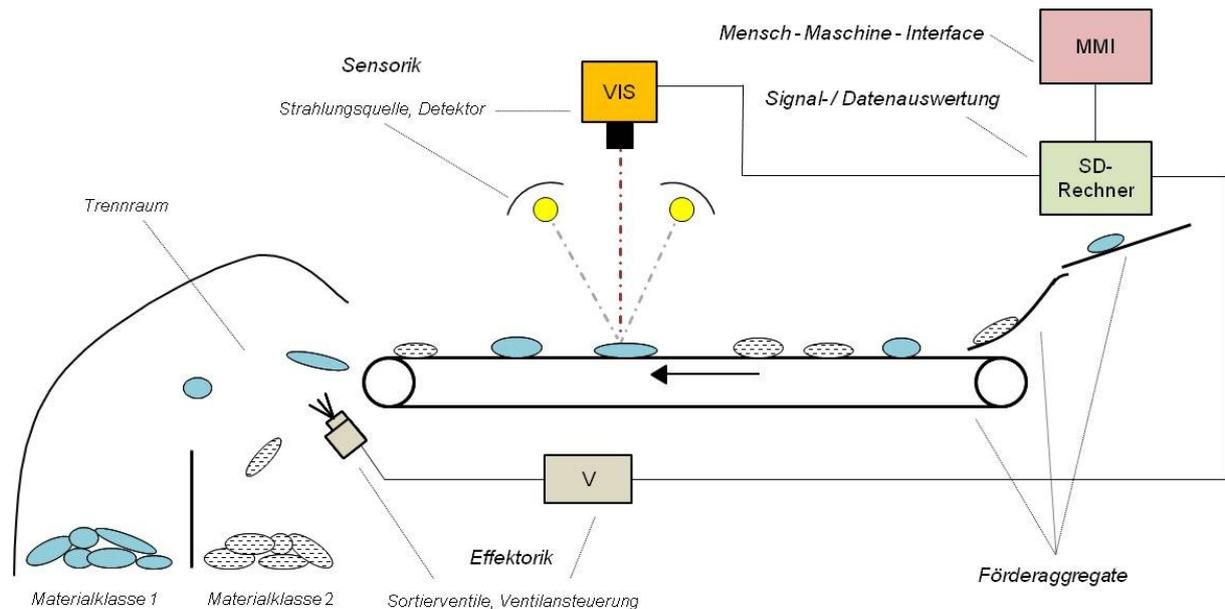


Abbildung 31: Skizze der Baugruppenanordnung - Bandsortierer

Im Unterschied zum Rutschensortierer werden die Objekte mittels Förder- bzw. Sortierband durch den Detektionsbereich transportiert. Zur besseren Vereinzelung und gerichteten Übergabe der Objekte auf das Band ist bei modernen Systemen, wie dargestellt, meist eine speziell geformte Beschleunigungsrutsche zwischen Vibrationsrinne und Sortierband integriert. Nach einer kurzen Beruhigungsphase liegen die Objekte vereinzelt stabil am Gurt und es gibt keine Relativbewegung mehr zwischen den Einzelobjekten und dem Fördergurt. Die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit der Einzelobjekte während der Detektionsphase ist alleine durch das Förderband bestimmt und steuerbar. Moderne Systeme werden mit bis zu 6 m/s betrieben und es lassen sich dadurch sehr hohe Durchsätze erzielen. In manchen Fällen limitiert ein im Verhältnis zur Haftkraft hoher Luftwiderstand die zulässige Bandgeschwindigkeit. Beispielsweise liegt für Kunststoff- oder Papierfraktionen die zulässige Bandgeschwindigkeit unter 3 m/s. Die aktive Sortierbreite industriell eingesetzter Bandsortierer beträgt zwischen 500 bis 3.000 mm.

5.2.2.3 Sondertypen

Neben den heutzutage überwiegend eingesetzten Band – und Rutschensortierern, die eine durchsatzstarke breitflächige zweidimensionale Vereinzelung charakterisiert, wurden auch sogenannte „Single-Stream Sortierer“ in den neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts vorwiegend für die Sekundärrohstoffaufbereitung entwickelt und eingesetzt. Meist bedingten die geringe sensorische Auflösung und/oder die hohen Kosten, insbesondere für NIR-Detektoren, eine aufwendige eindimensionale Vereinzelung und Mehrfraktionstrennung. Vor allem die geringe Durchsatzleistung und die hohe Systemkomplexität können als wesentliche Nachteile angeführt werden. Sie standen einem breiteren wirtschaftlichen industriellen Einsatz entgegen. Zudem sind nunmehr Detektoren mit höherer örtlicher und zeitlicher Auflösung verfügbar.

In Abbildung 32 werden mittels einer speziellen Schwingmaschine, welche am Ende mit parallelen Schachtkanälen ausgeführt ist, die Objekte wie Altglasflaschen eindimensional vereinzelt und schmalen Förderbändern zugeführt. Die Objekte werden an einer VIS-Sensorik und den Effektorikmodulen vorbeigeführt sowie seitlich orts- und zeitrichtig mittels Druckluftimpulsen ausgetragen und nach Fraktionen sortiert. Die Binder+Co AG hat derartige Sortiersysteme Mitte der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts entwickelt und etwa nach Frankreich und Australien geliefert. Der geringe Anteil an ganzen Flaschen auf Grund von Umlade- und Transportvorgängen im Aufgabegut und der hohe Nachaufbereitungsaufwand sowie die Entwicklung leistungsfähiger optischer Rutschensortierer, machten den Einsatz jedoch unwirtschaftlich.

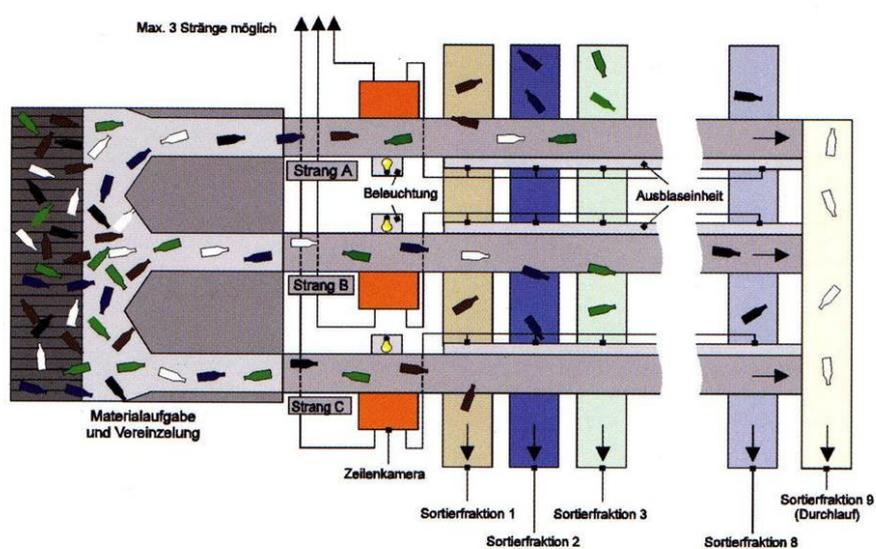


Abbildung 32: Sortierer „GFS“ mit Schwingensystemvereinzelung (Binder+Co AG)

Bei dem in Abbildung 33 dargestellten System werden die Objekte wie Kunststoffflaschen auf einen rotierenden speziell ausgeformten Metallteller aufgegeben. Durch die Zentrifugalkraft werden die Objekte an den perforierten Drehtellerrandbereich befördert und vereinzelt. Die Objekte werden anschließend an den am Umfang positionierten Sensorik- und Effektorikmodulen vorbeigeführt und nach Fraktionen sortiert. Als Besonderheit sind die Sortierventile unter dem Drehteller positioniert und die Objekte werden nach oben hin seitlich ausgetragen. Die Binder+Co AG hat dieses patentierte Sortiersystem (54) entwickelt und derartige Sortiersysteme mit NIR-Sensorik und VIS/NIR-Sensorik beispielsweise 1998 nach Japan geliefert.

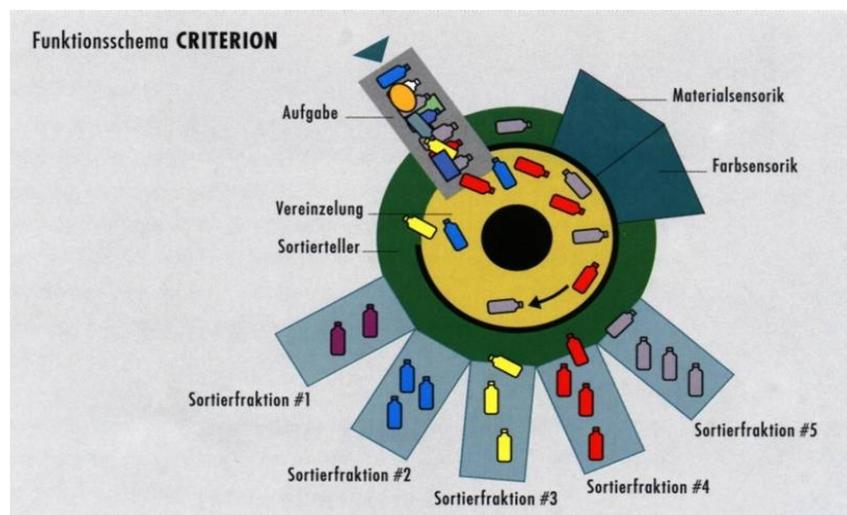


Abbildung 33: Sortierer „CRITERION“ mit Drehtellervereinzelung (Binder+Co AG)

In einer Weiterentwicklung wurde das konstruktive Trennkonzept auf einen Bandsortierer übertragen. In Abbildung 34 ist diese ebenfalls patentierte aktuelle Sortierlösung (55) zur Herstellung von bis zu sechs Kunststofffraktionen schematisch und bildlich dargestellt.

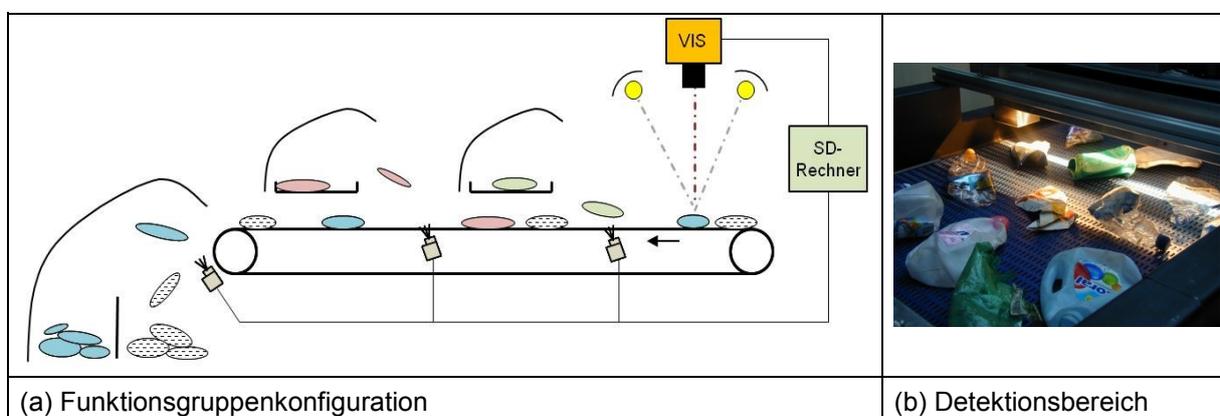


Abbildung 34: Sortierer „CRITERION PLUS“ mit perforiertem Fördergurt

5.2.3 Technologische Aspekte für eine hohe Sortiereffizienz

In Anlehnung an H. Schubert (51), aber der erhöhten Bedeutung der digitalen Daten- und Bildverarbeitung in modernen sensorgestützten Sortieren angepasst, können die Funktionsphasen, aus denen das Funktionsmodell entsprechend der Abbildung 29 in 5.2.1 aufgebaut ist, der physikalischen Aufbaustruktur des Rutschen- und Bandsortierers, wie in Abbildung 35 dargestellt, zugeordnet werden. Die Funktionsphasen

- **Vereinzelung** und Transport der Materialstromobjekte,
- **Detektion** von merkmalsklassenbestimmenden Eigenschaften an den Einzelobjekten,
- **Klassifikation** der Einzelobjekte und
- physikalische **Trennung** der Einzelobjekte nach der Merkmalsklassenzuordnung

folgen örtlich und zeitlich aufeinander.

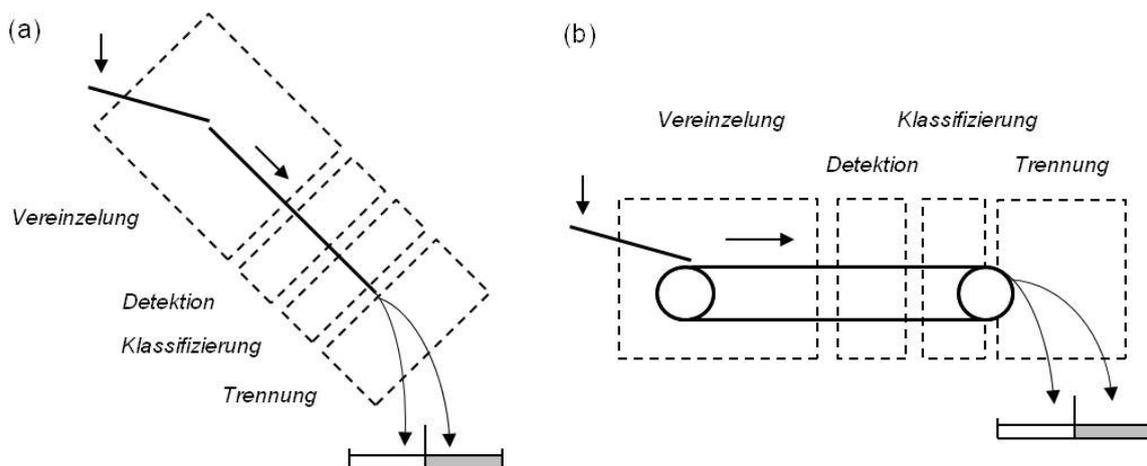


Abbildung 35: Funktionsphasenmodell: a) Rutschensortierer, b) Bandsortierer; Quelle: (2), adaptiert

Die Baugruppen realer Sortierer erfüllen die zugeordneten Funktionen vom Ideal abweichend mit einem gewissen Wirkungsgrad.

Die Einzelwirkungsgrade η_{Ver} , η_{Det} , η_{Kl} und η_{Tphy} der Funktionsphasen multiplizieren sich nach (5.12) zum Systemwirkungsgrad η_{Sys} und dieser entspricht der Sortiereffizienz.

$$\eta_{Sys} = \eta_{Ver} * \eta_{Det} * \eta_{Kl} * \eta_{Tphy} \quad (5.12)$$

Auf eine mathematische Darstellung oder Erörterung von Bewertungsmethoden der Einzelwirkungsgrade wird hier nicht weiter eingegangen. Die maschinenbauliche Funktionsphasenzuordnung und der Bezug auf Einzelwirkungsgrade unterstützt aber eine systematische Optimierung und Weiterentwicklung von Sortiersystemen. Für die einsatzspezifische mathematische Bewertung des Systemwirkungsgrades können Betriebskenngrößen wie der Trennungsgrad, welcher unter 5.1.1 erörtert wurde, herangezogen werden (5.13).

$$\eta_{Sys} \equiv \eta_T \quad (5.13)$$

Um eine hohe Sortiereffizienz zu erreichen, ist es erforderlich die Sortiergerätetechnologie und -konstruktion auf den jeweiligen Einsatzfall hin zu optimieren. Die technologische Ausprägung und die Kenndaten der einzelnen Baugruppen sowie deren Position variieren daher je nach Aufgabenstellung.

Daraus folgt, dass jede einzelne Phase in der Funktionskette mit hoher Genauigkeit und Effizienz arbeiten muss. Schwächen in einzelnen Phasen führen zu suboptimalen Sortierergebnissen bzw. ungenügender Trennschärfe. Jede Funktionsphase und die Schnittstellen sind für sich zu optimieren und möglichst robust gegenüber Umgebungseinflüssen sowie Änderungen der Sortierguteigenschaften zu gestalten.

Eine hochwertige **Vereinzelung** basiert auf

- kontinuierlicher gleichmäßiger Beschickung,
- auf die Transportflächengeschwindigkeit v' [m^2/s] abgestimmte Aufgabemenge und
- gleichgerichteter Beschleunigung der Objekte und

ist am Ende der Vereinzelungsphase charakterisiert durch

- berührungsfrei gleichmäßig verteilte Objekte auf der Transportfläche,
- deren Bewegungsvektoren gleichförmig und
- ident dem Materialstromvektor sind.

Eine hochwertige **Detektion** basiert auf

- industriell detektierbaren,
- merkmalsklassenspezifischen Eigenschaften bzw. Eigenschaftsunterschieden und

ist charakterisiert durch

- gutes Signal-Rauschverhältnis ($S/N > 10$) sowie
- hinreichende örtliche, zeitliche und spektrale Auflösung.

Eine hochwertige **Klassifizierung** basiert auf einer

- schnellen Datenaufbereitung (z.B.: Analog/Digital-Wandlung, Normierung und Filterung),
- effizienten Datenreduktion und Attributbildung (z.B.: Objektfläche, Objektgeometrie, Farbverteilung),
- geeigneten robusten Klassifikationsmethode und

ist charakterisiert durch

- hohe Klassifikationsgüte sowie
- exakte Effektoriksteuerdaten.

Eine hochwertige **Trennung** basiert auf

- gleichförmigen homogenen Bewegung der Einzelobjekte,
- kurzen Reaktionszeiten der effektorischen Elemente,
- hinreichender Impulskraft und

ist charakterisiert durch

- energieminierte,

- abrupte gerichtete Bewegungsänderung der auszutragenden Objekte sowie
- unbeeinflusste Bewegung der anderen Objekte.

Neben den Funktionsphasen selbst kommt auch den mechanischen und elektronischen Schnittstellen eine große Bedeutung zu. So ist auf eine stetige Materialübergabe an den mechanischen Übergängen und eine ausreichende Übertragungsrate zwischen den elektronischen Komponenten zu achten.

Oftmals sind aber auch bei hohen Systemwirkungsgraden die erforderlichen Sortiergutqualitäten nicht erreichbar oder eine Mehrfraktionstrennung erforderlich. In diesen Fällen kommen mehrstufige und/oder parallele Sortierprozesse zum Einsatz. Diese können auch ineinander und/oder mit Rückführungen verschaltet sein. In hochentwickelten sensorgestützten Trennprozessen wie in der Altglasaufbereitung können über zwei Dutzend optische Sortierer integriert sein. Dazu sei auch auf die Fallbeispiele in Kapitel 6.4 verwiesen.

5.3 Baugruppen optischer Sortierer und deren Funktion

In diesem Abschnitt werden die Baugruppen und Komponenten von optischen Sortierern sowie deren Funktion erläutert. Insbesondere wird auf die bei Binder+Co AG eingesetzte Sortiertechnologie eingegangen, welche auf Grund der guten Marktposition als repräsentativer Stand der Technik betrachtet werden kann. Dies ist auch der technische Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit und Basis der baugruppenbezogenen Weiterentwicklung und der Versuchsreihen.

In der Vergangenheit stand bei der Entwicklung der optischen Sortierung oftmals die Sensorik und dabei wiederum die Detektortechnologie alleine im Fokus. Die praktische Erfahrung und systematische, oft universitär begleitete, Potentialanalysen führten zu einer Bewusstseinsbildung und Neuausrichtung der Entwicklung, die alle Baugruppen deutlich ausgewogener umfasst. Beispielsweise rückte dadurch in den letzten Jahren die Effektorik und deren Elemente in den Fokus und wurden gezielt weiterentwickelt. Im Folgenden wird auf die Baugruppen und –komponenten in Abhängigkeit der Relevanz für diese Forschungsarbeit näher eingegangen sowie auf Auswahl- und Auslegungskriterien bezuggenommen.

5.3.1 Vereinzelnungs- und Transportsystem

Wie bereits unter 5.2.2 ausgeführt, ist eine gleichmäßige Vereinzelnung und ein kontinuierlicher stetiger Transport die Basis für eine effiziente Sortierung. Die wesentlichen Elemente zur Vereinzelnung und für den Transport sind:

- Aufgaberinne
- Beschleunigungsrutsche
- Förder- bzw. Sortierbänder
- Übergabe- und Führungselemente
- Entwässerungs- und Entstaubungsvorrichtungen

In Abbildung 36 ist beispielhaft ein Bandsortiersystem mit vorgelagerten Aggregaten dargestellt.

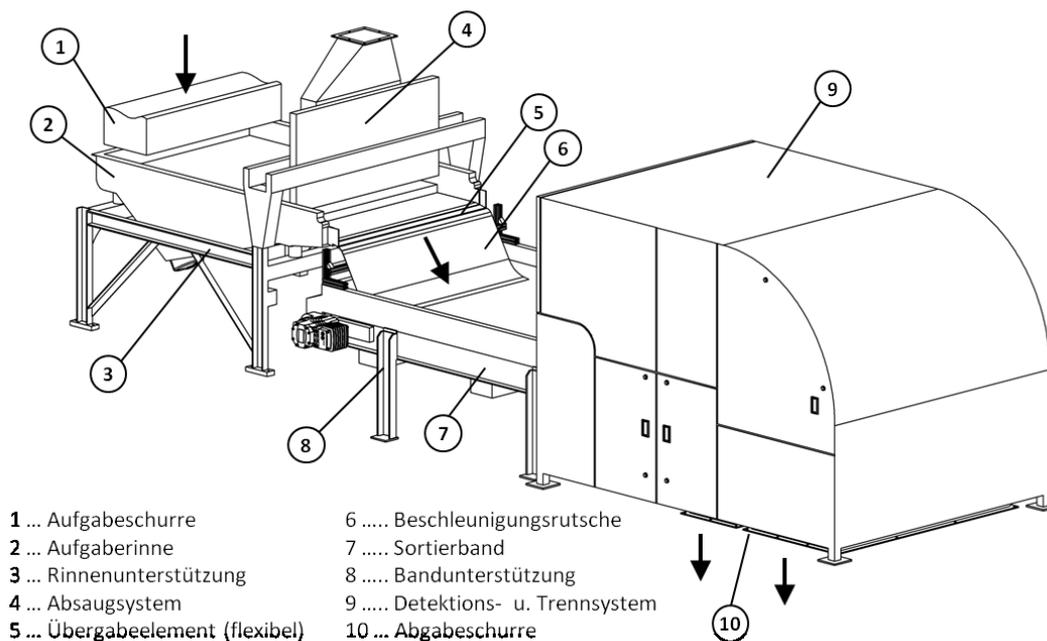


Abbildung 36: Systemskizze - Bandsortiersystem mit vorgelagerten Aggregaten

Die Aufgaberinne wird als Aufgabe- und erstes Vereinzelnungsaggregat eingesetzt. Sie sind Vibrationsrinnen, welche entweder mit Unwucht- oder Magnetantrieben ausgestattet sind und werden idealerweise über einen Frequenzumrichter gesteuert. Über die Erregungsfrequenz f_U [Hz] kann flexibel die Schwingcharakteristik an die Transporteigenschaften des Aufgabegutes angepasst werden. In Tabelle 10 sind - aus Versuchsreihen abgeleitete - Kennwerte für den Einsatz von Unwucht- und Magnetrinnen in

der Altglassortierung angegeben. Grundsätzlich gilt, je kleiner die Objekte, desto kleiner ist die Schwingweite zu wählen.

| Antriebsart | Kornfraktion/ Bereich [mm] | Frequenz f_U [Hz] | Drehzahl [U/min] | Schwingweite [mm] | K | Kv |
|-----------------|-------------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|------|------|
| Unwucht 4-polig | Grob/30-60 | 50 | 1500 | 3,5 | 4,40 | 2,20 |
| | Mittel/18-30 | 60 | 1800 | 2,4 | 4,34 | 2,17 |
| | Fein/8-18 | 65 | 1950 | 2,1 | 4,37 | 2,18 |
| | | 70 | 2100 | 1,9 | 4,64 | 2,32 |
| | Feinst/2-8 | 75 | 2250 | 1,5 | 4,36 | 2,18 |
| Magnetantrieb | Grob/30-60 | 25 | - | 3,5 | 4,40 | 2,20 |
| | Fein u. Mittel/8-30 | 33 | - | 2 | 4,38 | 2,19 |

Tabelle 10: Vibrationsrinne - Einstellparameter und Kenndaten

Die Transportfläche kann mit Längsrillen oder Kanälen in Förderrichtung ausgeführt sein, aber sie ist üblicherweise konturlos bzw. plan.

Die Beschleunigungsrueten, welche in Rutschensortierern eingesetzt werden, sind aus Metall, Glas oder Werkstoffkombinationen, wie Keramik auf Metall und am Ende gerade auslaufend. Die Oberfläche ist üblicherweise plan, kann aber für spezielle Einsatzfälle mit Längsrillen oder Kanälen ausgeführt sein. Die Neigung liegt zwischen 45° bis 75°.

Die Beschleunigungsruete in Bandsortierern ist im Wesentlichen ein Zwischenelement, welches zur Angleichung der Objektbewegung an die Förderbandbewegung dient und dazu bevorzugt aus Metall mit Ein- und Auslaufradien ausgeführt ist. Die Beruhigungsphase am Förderband wird so minimiert.

Die eingesetzten Förder- oder Sortierbänder sind konstruktiv derart ausgeführt, dass Laufruhe bei der erforderlichen hohen und gegebenenfalls unterschiedlichen Bandgeschwindigkeit sowie dem verhältnismäßig ungünstigen Verhältnis von Länge zu Breite gegeben ist. Die Bandgeschwindigkeitssteuerung erfolgt zumeist mittels Frequenzumrichter. Der abgabeseitige Trommelradius sollte möglichst klein sein und beträgt zwischen 60 und 200 mm in Abhängigkeit zu Aufgabegutkornspanne. Ebenso variiert der Fördergurt bezüglich der Stärke und des Materials. Bevorzugt werden Gurte aus Gummi oder Polyurethan eingesetzt.

Um un stetige Materialbewegungen zu vermeiden, werden an der mechanischen Schnittstelle zwischen Aufgaberinne und Beschleunigungsrutsche formschlüssige flexible Elemente aus Polyurethan eingebaut. Zudem können entlang des Förderweges passive Führungselemente, wie Bremsvorhänge und aktive Führungselemente, wie Abdeckungen in Kombination mit gerichteter Fluidströmung, integriert sein.

5.3.2 Aufbau und Funktion von optischen Sensoriken

Mit Ausnahme von Sortiersystemen, die die natürliche Radioaktivität von Rohgutfraktionen als Klassifizierungseigenschaft nutzen, besteht üblicherweise die Sensorik aus zwei wesentlichen Komponenten - der Beleuchtung bzw. dem Emitter und dem Detektor bzw. Sensor. Dies trifft insbesondere für optische Sensoreinheiten, wie in Abbildung 37 dargestellt, zu. Zum Konditionieren, Leiten und Sammeln von Strahlung sind zudem optische Elemente wie Objektive, Spiegel und Filter integriert (56). Die vom Emitter erzeugte und gerichtete elektromagnetische Strahlung trifft auf das Objekt, interagiert mit diesem und die resultierende Strahlung gelangt direkt, oder wie beispielhaft dargestellt, über optische Elemente zum Detektor. Der Strahlungsverlauf vom Emitteraustritt bis zum Sensoreintritt wird als optischer Weg eines Sensorsystems bezeichnet.

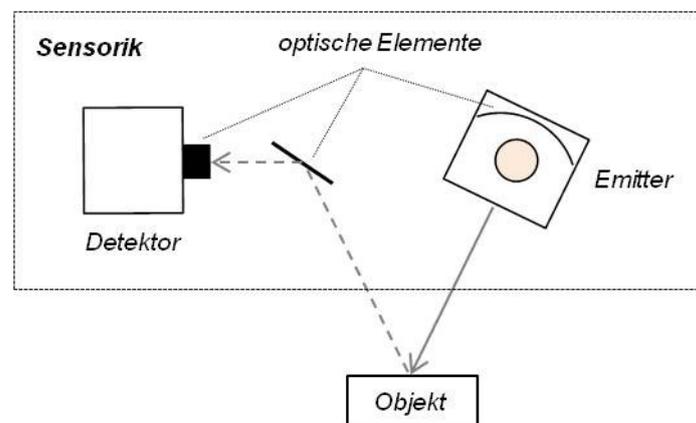


Abbildung 37: Aufbauschema einer optischen Sensorik

Die Konstellation aus Detektor, Emitter, optischen Elementen und Objekt hat viele Freiheitsgrade. Voraussetzung jeder erfolgreichen Lösung ist aber, dass das Spektrum der auftreffenden Strahlung die merkmalsrelevanten Bereiche enthält und der Detektor in diesen Bereichen entsprechend empfindlich ist. Eine sorgfältige Auseinandersetzung mit den optophysikalischen Effekten ist daher für Sensorikentwickler und Maschinenbauer erforderlich und unterstützt ein spezifisches Design. Die Konstellation wird auf die Aufgabenstellung abgestimmt und so gewählt, dass klassifizierungsrelevante Signale und Bilddaten mit maximalem Informationsgehalt erzeugt werden (57).

Je nach Gestaltung der Konstellation können prinzipiell folgende Eigenschaften der detektierten Strahlung bzw. Kombinationen dieser Eigenschaften ausgewertet werden:

- Intensität
- örtliche Intensitätsverteilung
- Spektrum bzw. spektrale Intensitätsverteilung
- Abstrahlcharakteristik
- Phase
- Kohärenz
- Polarisierung
- Zeitverhalten

Für die industrielle optische Sortierung von Schüttgütern sind im Wesentlichen nur die Intensität, die örtliche Intensitätsverteilung, das Spektrum und die Abstrahlcharakteristik relevant.

5.3.2.1 Detektion und Bildaufnahme

Der Sensor misst die räumliche und/oder spektrale Verteilung der Emissionsintensität im Messfeld über ein definiertes Zeitintervall. Intern werden die analogen Signale umgewandelt, digitalisiert und in einem pixelbasierten Format abgespeichert. Diese sogenannten Rohdaten werden gegebenenfalls direkt in der Sensorik vorverarbeitet und über ein Interface an die Datenverarbeitungseinheit übertragen. Bevorzugt eingesetzt werden heutzutage dafür Zeilenkameras oder zeilengenerierende Sensoren, die quer zur Objektbewegungsrichtung ausgerichtet sind. Durch periodische Wiederholung der Messung in zeitdiskreten Abständen am relativ zum Detektor bewegten Objekt bzw. am Objektstrom, werden fortlaufend Bildzeilen erzeugt, sequenziell abgespeichert und so zweidimensional orts aufgelöste Abbildungen des Objektstromes erzeugt. In Abbildung 38 ist dieser Bildaufnahmevorgang am Beispiel eines Aufbaus mit einer Zeilenkamera schematisch dargestellt und illustriert.

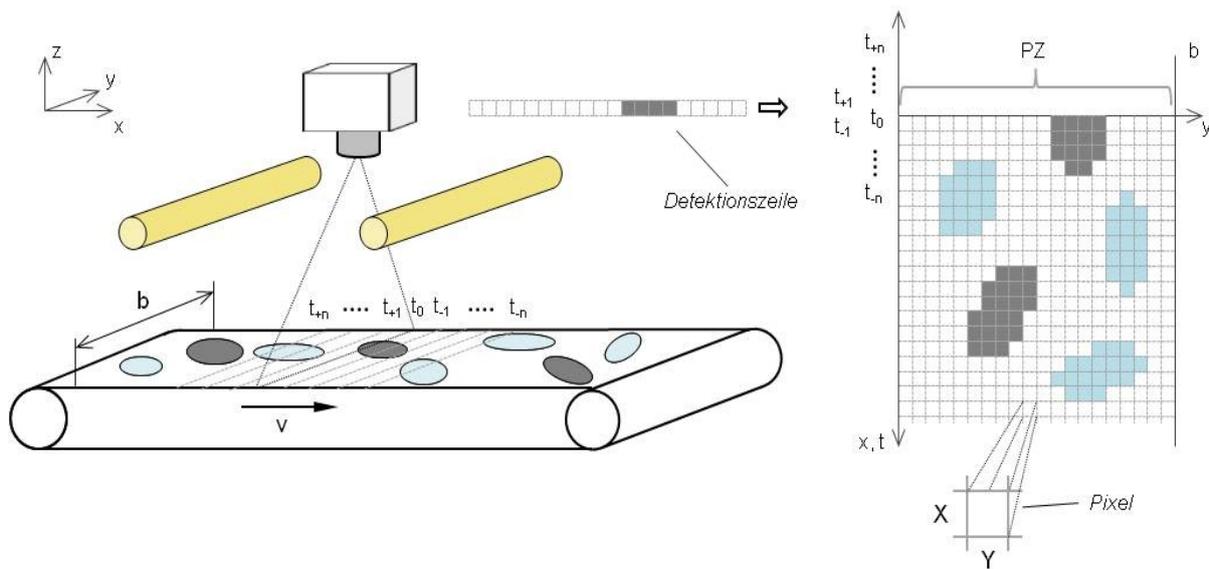


Abbildung 38: Bildaufnahme mit Zeilenkamera

Ziel der Bildaufnahme ist es, annähernd quadratische Bildelemente bzw. Pixel zu erzeugen, um möglichst die realen geometrischen Verhältnisse abzubilden. Die Messfrequenz bzw. Taktrate, mit der die Messung wiederholt wird, ist daher auf die optischen Abbildungsverhältnisse in y-Richtung und die Fördergeschwindigkeit v [m/s] abzustimmen. Die Abbildungslänge in y-Richtung Y [mm] je Pixel ist nach (5.14) durch die Sortierbreite b [mm] und Pixelanzahl PZ [1] des eingesetzten Zeilendetektors gegeben.

$$Y = b/PZ \quad (5.14)$$

Für quadratische Pixel gilt für die Abbildungslänge in x-Richtung $X = Y$ und ergibt sich die ideale Messfrequenz $f_{Messung}$ [1/s] nach (5.15).

$$f_{Messung} = \frac{v}{X} = \frac{v}{Y} \quad (5.15)$$

Beispielsweise ergibt sich bei einer Detektorsbreite b von 1 m, einer Pixelanzahl PZ von 2.048 und einer Fördergeschwindigkeit v von 3 m/s für die Messfrequenz $f_{Messung}$ ein Wert von 6 kHz. Die Abbildungs- bzw. Pixelauflösung beträgt für diese Konfiguration 0,49 x 0,49 mm.

In der Praxis erzwingen technische Grenzen des Öffern ein Abweichen von dieser Regel. In diesen Fällen müssen die verzerrten Abbildungsverhältnisse in der Daten- und Bildauswertung berücksichtigt werden. Schwankungen der Fördergeschwindigkeit oder Taktrate bewirken temporäre Abbildungsverzerrungen in x-Richtung und führen unter

Umständen zu Störungen der Klassifikation und Trennung. Um dies zu vermeiden, kann die Sensorik und/oder die Bildauswertung mittels Geschwindigkeitsgebern mit dem Förderaggregat synchronisiert werden.

Jedem Pixel sind je nach Aufbau des Sensors n-dimensionale spektrale Daten zugeordnet. In Abbildung 39 ist schematisch ein Ortspixelausschnitt (x, y – Achsen) und die den angeführten Sensoren entsprechende diskrete spektrale Auflösung (λ – Achse) dargestellt.

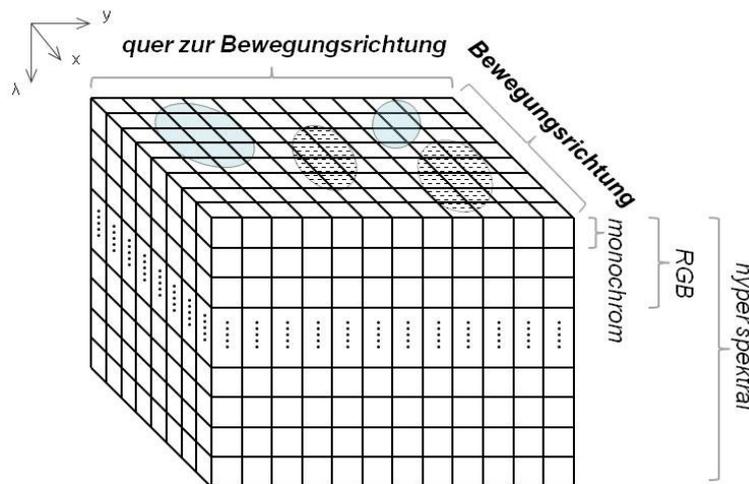


Abbildung 39: Schema der örtlichen und spektralen Bilddaten

Wie in (5.16) formal ausgedrückt, ist das digitale Abbild I damit eine zweidimensionale Funktion von ganzzahligen Koordinaten $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ auf eine Menge von Intensitätswerten \mathbb{P} (58).

$$I(x, y) \in \mathbb{P} \quad \text{und} \quad x, y \in \mathbb{N} \quad (5.16)$$

Ausgehend von der üblichen 8 Bit-Digitalisierung bzw. –Dynamik erhält man mit monochromatischen Detektorzeilen einen Intensitätswert je Pixel im Wertebereich $[0 \dots 255]$ und somit eine Grauwertabbildung mit 1×8 Bit an Intensitätsabstufungen. Hingegen werden bei den eingesetzten RGB-Detektorzeilen drei Intensitätswerte (Rot, Grün und Blau) je Pixel im Wertebereich $[0 \dots 255]$ detektiert und somit $3 \times 8 = 24$ Bits je Pixel gespeichert. Die Graphik in Abbildung 40 zeigt die unbearbeiteten Intensitätswerte (Ordinate) je Pixel (Abszisse) für die drei Farbkanäle einer Zeilenkamera mit Lumineszenzröhrenbeleuchtung.

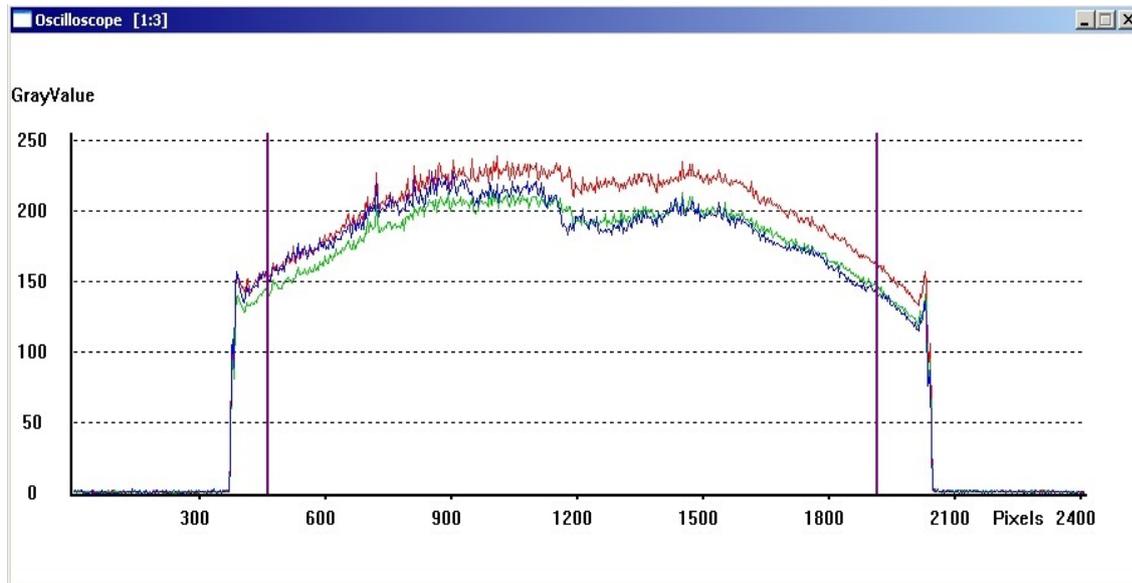


Abbildung 40: Graphische Darstellung eines rohen digitalisierten RGB-Zeilensignals (8 Bit)³

Mit sogenannten „Hyper Spectral Imaging“-Sensoren kann spektral hochauflösend detektiert werden und können hunderte diskrete spektral zugeordnete Intensitätswerte je Pixel im Wertebereich [0...255] verknüpft sein. Siehe dazu auch Tabelle 11 und die beigefügten Erläuterungen.

Die spektralen Datenwerte repräsentieren die digitalisierte Interaktionsinformation zwischen Strahlung und Objekt. Auch wenn immer leistungsfähigere Sensoren mit höherer Pixelanzahl und Taktrate am Markt verfügbar sind, empfiehlt es sich die Auflösung bzw. Datenmenge so gering wie erforderlich zu halten. Grundsätzlich gilt, je höher die Auflösung, desto höher die Sensorkosten, die Datenmengen und auch die erforderliche Rechenleistung für die Datenverarbeitung.

5.3.2.2 Sensoren für die optische Sortierung

Ursprünglich wurden die eingesetzten zumeist monochromatischen Detektoren mit einzelnen Photodioden und anwendungsspezifischer Digitalisierungs- und Auswertungs elektronik aufgebaut sowie zu Arrays aneinander gereiht. Beispielsweise wird ein derartiges Konzept in der Patentschrift EP 0479 756 A2 (59) zur Aussortierung nichttransparenten Störstoffen wie Keramik, Steine und Porzellan aus Glasbruchfraktionen beschrieben. Mittels Filterelementen kann der Wellenlängenbereich angepasst werden. In den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurde begonnen integrierte CCD-Zeilendetektoren einzusetzen und

³ Erstellt mit „Clarity2“, Version: 2.6.0, © by Binder+Co AG

mikrocontrollerunterstützt auszuwerten. Heutzutage kommen in Abhängigkeit der zu detektierenden optischen Eigenschaften und des Sensorikkonzeptes unterschiedliche am Markt verfügbare Zeilenkameras oder zeilengenerierende Kamerasysteme mit Matrix- bzw. Flächendetektoren zum Einsatz. Die Sensoren aktuell eingesetzter Kameratypen basieren zumeist noch immer auf der CCD-Technologie. Es gibt aber auch vermehrt Entwicklungen bei denen CMOS-Technologie genutzt wird (13). Die etwas jüngere CMOS-Technologie hat sich seit den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts, getrieben durch die Unterhaltungselektronik, technisch enorm weiterentwickelt. Es gibt nunmehr eine große Produktvielfalt und durch die hohen Stückzahlen sind diese vergleichsweise kostengünstig. Beide Technologien besitzen Vor- und Nachteile, welche beim Einsatz in der optischen Schüttgutsortierung zu beachten sind. Eine detaillierte Eigenschaftsbeschreibung und Gegenüberstellung findet man etwa im „*Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung*“ (60).

Grundsätzlich sind folgende Sensorkennwerte bei der Auswahl wichtig und relevant:

- Pixelanzahl
- Zeilen- bzw. Ausleserate
- Spektrale Empfindlichkeit und spektraler Arbeitsbereich
- Dynamikbereich

Darüber hinaus gibt es noch weitere Kennwerte für bildgebende Sensoren, wie Dunkelstrom, Signal-Rausch-Verhältnis oder Kennlinienlinearität, welche gegebenenfalls auch zu berücksichtigen sind.

Die **Pixelzahl** definiert die örtliche Auflösung quer zur Förderrichtung. Typischerweise werden in der optischen Sortierung Zeilenkameras mit 1.024, 2.048, 4.096, 8.192 oder 12.288 Pixel eingesetzt.

Die maximale **Zeilenrate**, die typischerweise zwischen 1 bis 50 kHz liegt, definiert bzw. begrenzt die örtliche Auflösung in Bewegungsrichtung bei einer gegebenen Objektgeschwindigkeit.

Die physikalisch mögliche **spektrale Empfindlichkeit** der Sensoren wird primär, wie auch in Kapitel 4.5 erörtert, durch die eingesetzten Halbleiterwerkstoffe definiert. Während sich dieser bei Sensoren auf Basis von Silizium (Si) vom UV- bis in den NIR-Bereich (200 bis

1.000 nm) erstreckt, sind Sensoren aus Germanium (Ge) oder Indium-Gallium-Arsenit (InGaAs) im infraroten Wellenlängenbereich von 1.000 bis über 2.000 nm einsetzbar. Zudem ist die Empfindlichkeit von der Effizienz der Konvertierung von Photoladungen in Photospannungen beeinflusst und steht selbstverständlich auch mit der aktiven Pixelfläche am Chip, welche nur einige zehn bis hundert μm^2 beträgt, in Zusammenhang (60). Der produktspezifische **spektrale Arbeitsbereich** wird durch on-chip Filter und/oder vorgesezte optische Bauteile weiter angepasst. In Abbildung 41 sind dazu beispielsweise die Kennlinienverläufe einer in der optischen Sortierung eingesetzten Zeilenkamera mit monochrom oder RGB-Filter dargestellt.

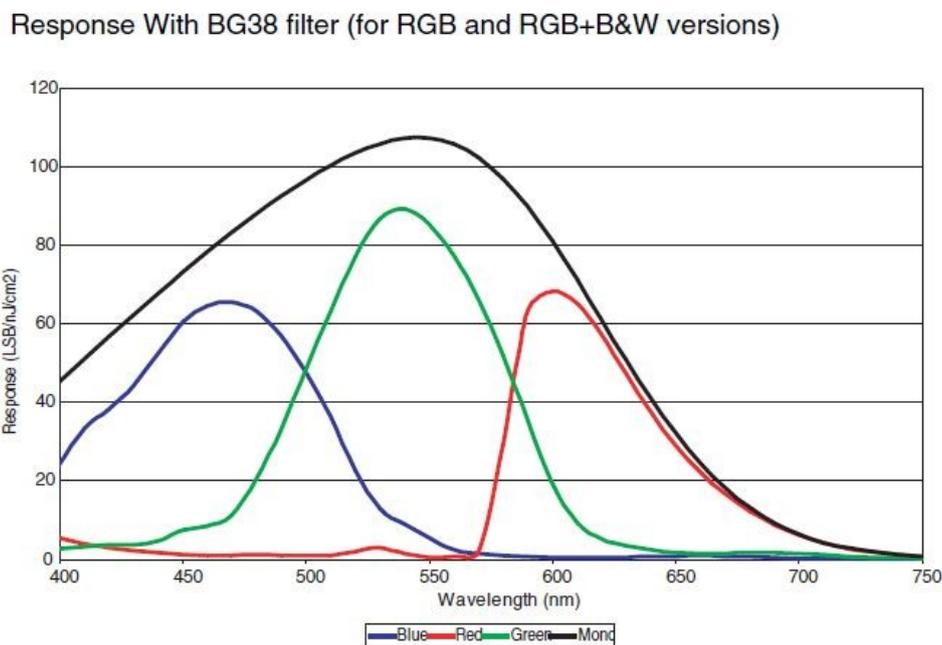


Abbildung 41: Spektrale Empfindlichkeit der monochromen (Mono) und der trilinearen (Blue, Red, Green) Zeilenkamera ELiiXA® von e2v mit IR-Filter; Quelle: (61)

Der **Dynamikbereich** bezeichnet den Quotienten aus größtem und kleinstem von Rauschen unterscheidbaren Helligkeitswert. Je höher die Dynamik, desto mehr Grau- bzw. Farbstufen können letztendlich vom Sensor unterschieden werden. Der Quotient wird üblicherweise in dB oder im 2er-Logarithmus als Bit angegeben. Die Datenausgabe erfolgt dann meist mit 8 Bit, evtl. auch auf Wunsch in 10 oder 12 Bit (62).

In Tabelle 11 sind verschiedene Schlüsseltechnologien im Sensoraufbau angeführt. Sie sind als Sensoren in Kameras integriert erhältlich und werden für die optische Sortierung eingesetzt:

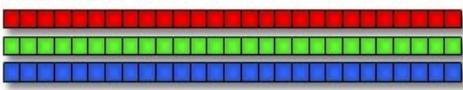
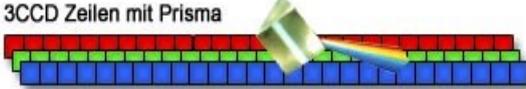
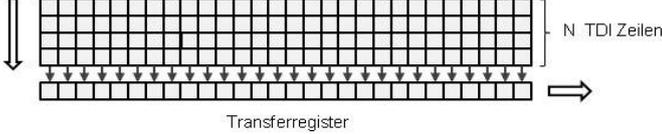
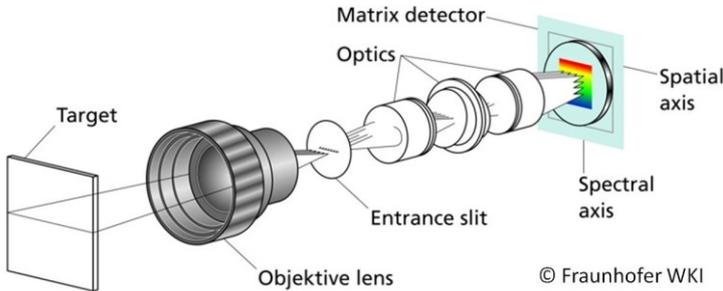
| Sensortyp | Aufbau | Eigenschaft |
|-----------------------------------|---|---|
| Einzelzeile |  <p>Einzel-Zeile</p> <p>(62)</p> | monochrom |
| Einzelzeile mit RGB-Tripel |  <p>Einzelzeile mit RGB-Tripel</p> <p>(62)</p> | farbsensitiv |
| Trilineare Zeile (RGB) |  <p>Trilineare Zeile</p> <p>(62)</p> | farbsensitiv, hohe örtl. Auflösung |
| 3CCD Zeilen mit Prisma (RGB) |  <p>3CCD Zeilen mit Prisma</p> <p>(62)</p> | farbsensitiv |
| TDI-Zeile |  <p>N TDI Zeilen</p> <p>Transferregister</p> | monochrom, hohe Empfindlichkeit |
| Hyper Spectral Imaging – Sensoren |  <p>Target</p> <p>Objektive lens</p> <p>Entrance slit</p> <p>Optics</p> <p>Matrix detector</p> <p>Spatial axis</p> <p>Spectral axis</p> <p>© Fraunhofer WKI</p> <p>(63)</p> | hohe spektrale Auflösung, geringe örtl. Auflösung |

Tabelle 11: Aufbau diverser Sensoren; Quellen: (62), (63)

Bei einer Dynamik bzw. Datenausgabe von 8 Bit sind mit monochromen Detektoren 256 Graustufenwerte und mit RGB-Zeilensensoren über 16 Millionen Farbwerte darstellbar. Es sei dazu auch auf das Prinzip der additiven Farbmischung, welches in 5.3.3.2 näher beschrieben wird, verwiesen.

Zur Steigerung der Lichtempfindlichkeit werden bei TDI-Zeilensensoren Matrixdetektoren mit bis zu 128 Zeilen eingesetzt, die das Signal der Zeilen vertikal zusammenfassen ohne physikalische Auflösung, wie bei einem horizontalen Binning, zu verlieren. Diese Sensoren sind dann etwa 128-fach empfindlicher als Einzeilen-Sensoren. Da bei diesem

Detektorkonzept viele Zeilen auch räumlich sehr weit voneinander entfernt liegen, muss die Bildaufnahme auf dem Sensor mit der Bewegung des Objektes sehr genau synchronisiert werden, damit beide Lageverschiebungen auf Band und Sensor übereinstimmen. Nur so lassen sich die Zeilensignale summieren, ohne dass extreme Bildunschärfen auftreten (62).

Bei Hyper Spectral Imaging – Sensoren zerlegt ein entsprechend positionierter und ausgerichteter Zeilenspektrograph das Licht in sein Spektrum und die Spektrenschärfe wird von einem Matrixdetektor aufgenommen. Dabei ergeben sich auf einer Detektionszeile (y -Achse) äquidistante Spektrallinien, die die lokalen Intensitäten im jeweiligen Wellenlängenbereich darstellen (λ – Achse). In der sensorgestützten Sortierung werden vermehrt NIR-Kamerasysteme mit dieser Technik eingesetzt. Diese sind beispielsweise mit der Sensorgröße von 320 x 254 Pixel und spektralen Arbeitsbereichen im VIS- und NIR-Bereichen bis 1.700 nm gut verfügbar. Die spektrale Auflösung liegt bei ca. 10 nm. Die hohe anfallende Datenmenge beschränkt die Ausleserate im „full frame mode“ auf unter 300 Hz. Durch Wellenlängenbereichseinschränkung oder „ROI-mode“ kann diese auf 3kHz erhöht werden (64). Beispielsweise ergibt sich - in Anlehnung an das zuvor berechnete Fallbeispiel mit einem Zeilensensor - bei einer Detektionsbreite b von 1 m und einer Fördergeschwindigkeit v von 3 m/s für den „full frame mode“ eine örtliche Abbildungsauflösung von nur 10,0 x 3,95 mm. Die realisierbare örtliche Auflösung ist im Vergleich zu den anderen in Tabelle 11 angeführten optischen Zeilensensoren gering. Im Vergleich zu anderen NIR-Sensortechniken ist die spektrale und örtliche Auflösung aber am höchsten (65). Zugunsten der maximalen örtlichen Auflösung wird zumeist auf quadratische Abbildungspixel verzichtet.

5.3.2.3 Beleuchtungstechnik

In der optischen Sortierung kommen verschiedene Strahlungsquellen und Beleuchtungstechniken im Auf- und/oder Gegenlichtverfahren, wie in Abbildung 42 dargestellt, zum Einsatz.

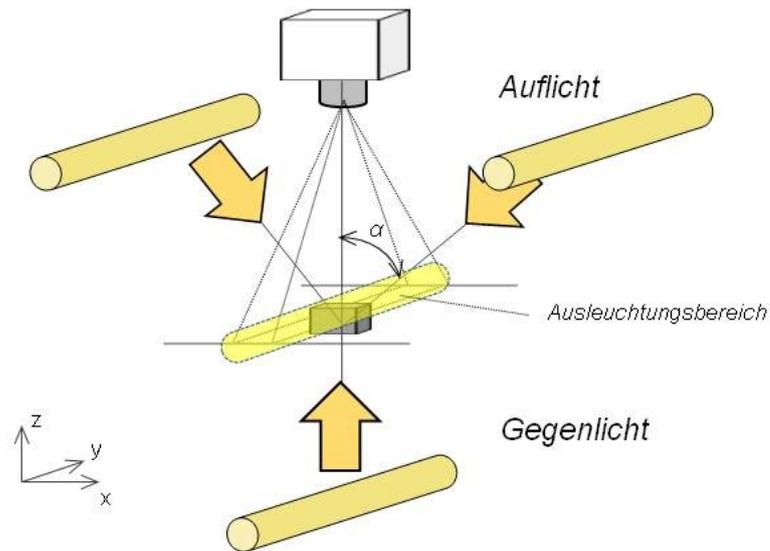


Abbildung 42: Belichtungsverfahren für die optische Sortierung

Das Gegenlichtverfahren, bei dem die Beleuchtungseinheit gegenüber dem Detektor oder der Kamera liegt, wird zur Detektion von Transmissionseigenschaften eingesetzt. Beim Auflichtverfahren sind Kamera und meist zwei symmetrisch angeordnete Beleuchtungseinheiten auf derselben Seite positioniert und sie kommt zur Detektion von Remissions-, und Reflexionseigenschaften zur Anwendung. Es kann auch zielführend sein beide Belichtungsverfahren zu kombinieren. Das Gegenlicht dient dann als aktiver Hintergrund oder kann zur Gewinnung von zusätzlicher Transmissionsinformation genutzt werden. Als Beispiel sei die in 6.4.4 näher beschriebene Sortierung von semitransparentem Quarzbruch und Feldspat angeführt.

Der Einsatz von Zeilenkameras bedingt eine längsgezogene Ausleuchtung der Szene. Der Lichtstrom soll möglichst konzentriert entlang der y-Achse sein. Die wesentlichen Parameter der Beleuchtungstechnik für die optische Sortierung sind

- Einfallswinkel der Strahlung,
- Strahlungscharakteristik,
- Strahlungsleistung bzw. dem Lichtstrom Φ [lm],
- Bestrahlungsstärke bzw. Intensität I [W/m^2] im Ausleuchtungsbereich,
- örtliche und zeitliche Intensitätsverteilung und
- spektrale Intensitätsverteilung bzw. die Farbtemperatur.

Grundsätzlich wird für alle Belichtungsverfahren eine möglichst diffuse Strahlung verwendet und der Einfallswinkel α der Auflichtstrahlung liegt bei $< 30^\circ$, wie in Abbildung 43 (a) dargestellt. Hoher parallel gerichteter Strahlungsanteil in Kombination mit extremem Einfallswinkel kann zu unerwünschten optischen Effekten führen. Beispielsweise kann es, wie in Abbildung 43 (b) dargestellt, bei einseitiger Beleuchtung und großem Einfallswinkel zu spiegelnder Reflexion, etwa an glänzenden Bruchkanten kommen, die wiederum die Überblendung einzelner Pixel oder ganzer Pixelbereiche bewirken. Zudem ergeben sich systembedingte Schattenbereiche, in den der Kontrast reduziert wird. Beide Effekte verändern den Informationsgehalt der Abbildung negativ.

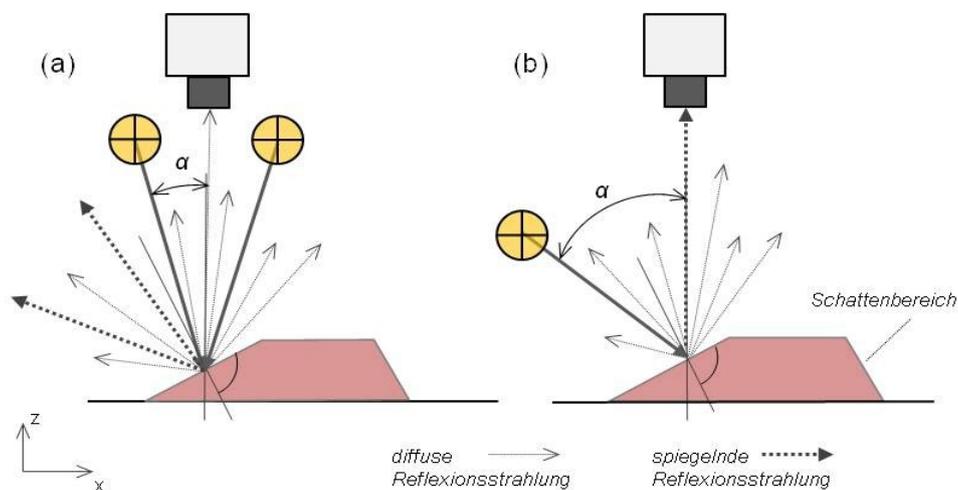


Abbildung 43: Auflichtanordnungen: (a) beidseitig frontal - günstig, (b) einseitig schräg - ungünstig

Die Positionierung (x,z-Ebene) von Kamera und Beleuchtung ist oftmals nur experimentell optimierbar, da die Variationsvielfalt der geometrischen Objekteigenschaften bezüglich Korngröße, Kornform und Oberflächenstruktur eine eindeutige theoretische Auslegung nicht zulassen.

5.3.2.4 Strahlungsquellen

In Tabelle 12 sind die wesentlichen verwendeten Strahlungsquellen angeführt. Für die farbbasierte Sortierung werden Leuchtstoffröhren und LED's, bei NIR-basierten Sortiersystemen meist Halogenstrahler eingesetzt. Sie alle haben individuelle, charakteristische Eigenschaften, die sie mehr oder weniger brauchbar im Einsatz machen. Mittels passiver optischer Bauteile wie Filter, Reflektoren, Fresnellinsen oder Spiegel wird die Strahlung der Quelle den applikationsspezifischen Anforderungen angepasst.

| Strahlungsquellen | Typenbespiele | Eigenschaft |
|-------------------------------|---|---|
| Leuchtstoffröhre |  (66) | diffus |
| LED, Power-LED |  (67) (68) | Gerichtet, hohe Strahlungsintensität |
| Halogen- und Infrarotstrahler |  (66) | diffus |
| Laser |  (69) (69) | mono-chromatisch, kohärent, hohe Strahlungsintensität |

Tabelle 12: Strahlungsquellen für die optische Sortierung; Quellen: (67)(68)(66) (69)

Die Leuchtstoff- bzw. Lumineszenzröhre gibt eine sehr diffuse und spektral breitbandige Strahlung mit lokalen Spitzen ab. Typen mit Tageslichtcharakteristik, die spektrale Verteilung wie in Abbildung 44 haben, welche im Blau-, Grün- und Rot-Bereich ausgeglichen emittieren, sind gut geeignet für die Farberkennung. Auch für alle UV-Bereiche sind Leuchtstoffröhren verfügbar.

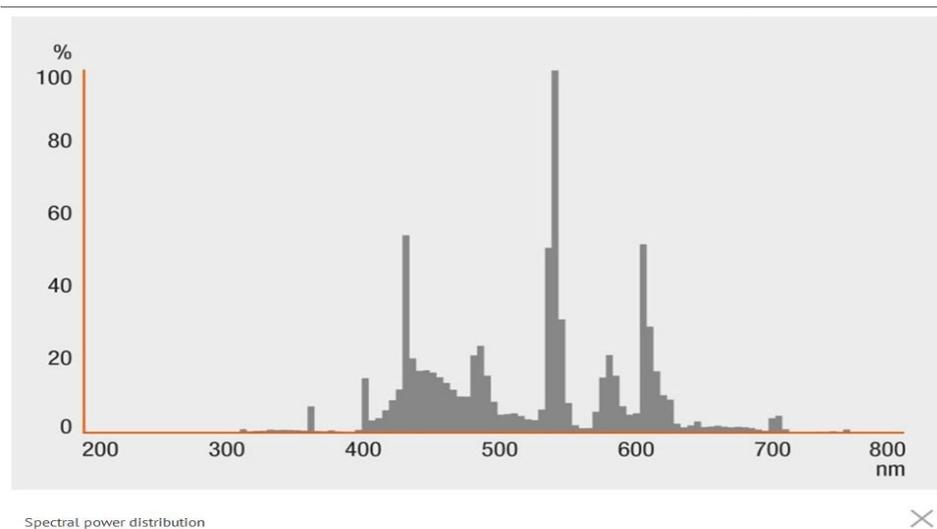


Abbildung 44: Spektrale Intensitätsverteilung einer Leuchtstoffröhre LF 865; Quelle (66)

Nachteilig sind die verhältnismäßig geringe Strahlungsleistung, die zu den Anschlussstellen hin abfällt und die geringe Lebensdauer. Zudem ist der für industrielle Anwendungen kleine Temperaturarbeitsbereich von ca. 10°C bis 35°C und die starke Temperaturabhängigkeit der Strahlungsleistung problematisch. Dies macht oftmals eine Klimatisierung erforderlich. Beim Einsatz von handelsüblichen Typen sind nur wenige nutzbare Dimensionen verfügbar. Spezielle Anfertigungen sind sehr kostenintensiv und qualitativ, da in Kleinserien hergestellt, kritisch.

Nicht zuletzt wegen der angeführten Restriktionen beim Einsatz von Leuchtstoffröhren werden wie in anderen Bereichen vermehrt LED-Beleuchtungen eingesetzt und so traditionelle Leuchtmittel ersetzt. Besonders die Entwicklung von Power-LED's die mittlerweile in großer Typenvielfalt verfügbar sind, hat neue Möglichkeiten der Beleuchtungsgestaltung speziell für die optische Sortierung eröffnet. Ihre charakteristischen Eigenschaften wie lange Lebensdauer, mechanische Robustheit, hohe Energieeffizienz und die Möglichkeit die Strahlungsleistung über einen weiten Bereich zusteuern, sprechen für ihren Einsatz (62). Zusammen mit den flexiblen Anordnungsmöglichkeiten lassen sich sehr gut abgestimmte Belichtungslösungen, sogenannte LED-Lines, mit hoher kontinuierlicher oder gepulster Strahlungsintensität herstellen. Sofern diese LED-Lines aus individuell steuerbaren Zonen aufgebaut sind, können damit Intensitätsprofile zum Ausgleich von optischen Abbildungsfehlern entlang der y-Achse, wie in Abbildung 40, erzeugt werden. Einzig die parallel gerichtete Strahlungscharakteristik und der enge Abstrahlwinkel erfordern aufwendigere Maßnahmen zur Erzeugung diffuser Strahlung und dem Ausgleich von örtlichen Unstetigkeiten der Intensität.

Die Emissionsspektren, wie in Abbildung 45 dargestellt, sind typischerweise schmalbandig, was für den praktischen Einsatz von Vorteil sein kann. So lassen sich sehr gut mit Hilfe von Filtern benachbarte Wellenlängenbereiche blocken oder bei entsprechender Anordnung unterschiedlich färbiger LED's spektral überlagern und Mischspektren generieren. Auch im UV- und IR-Bereich emittierende LED-Varianten sind verfügbar.

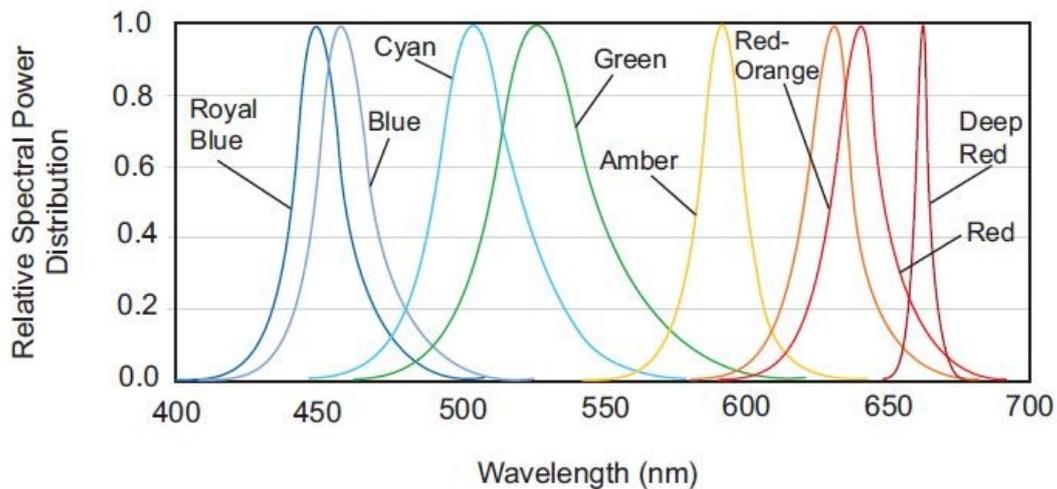


Abbildung 45: Spektraler Intensitätsverlauf diverser Farb-LED's / LUXEON Rebe; Quelle: (67)

Halogen- und Infrarotstrahler werden wegen der hohen Strahlungsleistung im NIR- und MIR-Bereich in entsprechenden Sortierern eingesetzt. Durch die verhältnismäßig hohe Rot-Intensität sind sie für die Farberkennung wenig geeignet. Nachteile und Restriktionen sind ähnlich wie bei der Leuchtstoffröhrentechnik. Zudem ist der hohe Wärmeeintrag in den Ausleuchtungsbereich kritisch. Entsprechend sind Klimatisierungs- und Überwachungsmaßnahmen zu setzen. In Abbildung 46 sind die spektralen Intensitätsverläufe diverser IR-Strahler abgebildet.

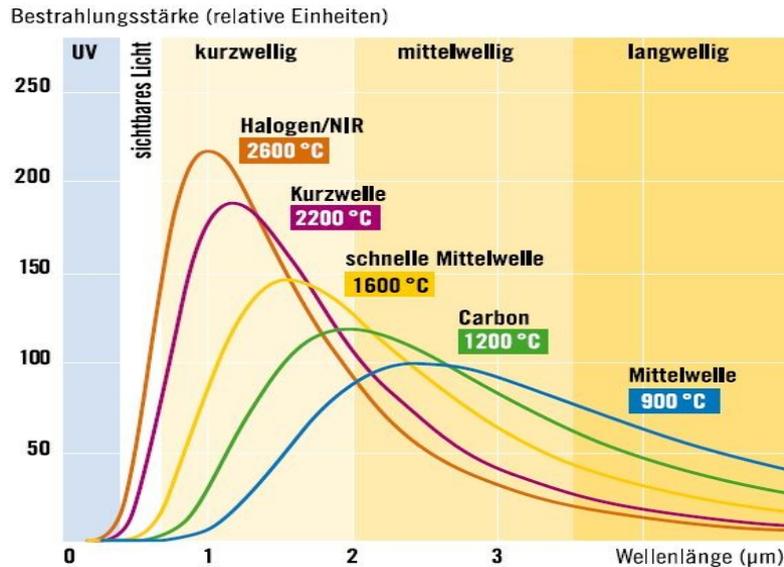


Abbildung 46: Spektralverteilung diverser Infrarot-Strahler normiert auf gleiche Strahlungsintensität; Quelle: (70)

Vor allem Strichlaser werden als Strahlungsquelle im Bereich der optischen Sortierung zur einfachen Intensitätsmessung und in der 3D-Vermessung, wie mittels Lichtschnittaufnahmen, zur Ermittlung geometrischer Merkmalseigenschaften eingesetzt. Laserstrahlen sind durch die Kombination von hoher Intensität, sehr engem Strahlungswellenlängenbereich, scharfer Bündelung des Strahls und großer Kohärenzlänge gekennzeichnet. Auch sind bei sehr weitem Frequenzbereich extrem kurze und intensive Strahlimpulse mit exaktem Impulsabstand möglich (26). Laser emittieren Wellenlängen vom UV- bis in den NIR-Bereich, wie beispielsweise 266, 322, 532, oder 1.064 nm.

Im Laufe des Alterungsprozesses verschiebt sich bei allen Leuchtmitteln die spektrale Intensitätsverteilung und die Strahlungsleistung reduziert sich. Ein regelmäßiges Kalibrieren der Sensorik ist daher erforderlich. Nicht homogene RGB-Farbanteile können mittels eines sogenannten Weißabgleichs korrigiert werden. Dies geschieht teilweise bereits in der Kamera auf einem Framegrabber oder mit Hilfe von Software auf der Signal- und Datenrecheneinheit. Der Detektionsbereich ist gegen Fremdstrahlung abzuschotten und Abdeckungs- und Gehäuseteile sind so auszuführen, dass keine störende Reflexionsstrahlung auftritt. Zudem sind meist Reinigungsrichtungen integriert, um verschmutzungsbedingte zeitliche und örtliche Veränderungen des optischen Wegs und die damit verbundene Signalbeeinflussung zu minimieren.

5.3.3 Signal- und Datenverarbeitungssystem

Das Signal- und Datenverarbeitungssystem übernimmt neben der eigentlichen Bilddatenverarbeitung und Objektklassifizierung auch die zentrale Steuerung und Kontrolle der Sensorik sowie zusätzlicher MSR-Elemente, wie beispielsweise Überwachungssensoren, Aktuatoren und Klimageräte, die in der Maschine integriert sind.

Im Fall von sogenannten „Smart Kameras“ oder „intelligenten Kameras“ ist die Signal- und Bildverarbeitung direkt in der Sensorik integriert. Ansonsten werden die Bilddaten mittels schneller Schnittstellen wie CameraLink an externe Signal- und Datenverarbeitungseinheit übermittelt. Eingesetzt werden dafür leistungsstarke Industrierechner bzw. IPC's mit Mehrprozessorstruktur und geschwindigkeitsoptimierter Software. Durch die physische Entkopplung der Bilddatenaufnahme und Bildverarbeitung kann die allgemeine rasante Entwicklung der Computertechnologie besser und flexibler genutzt werden. So können immer größere Datenmengen mit komplexeren Algorithmen verarbeitet werden.

Informationen über den Maschinenzustand oder statistische Daten werden an übergeordnete Steuereinheiten und/oder das MMI mit zumeist grafischer Oberfläche ausgegeben und so dem Bedienpersonal bereitgestellt. Beeinflusst wird der Sortierprozess durch eingespeicherte oder online mittels MMI geänderter Parameter. Für die Wartung, das Service, die Kalibration und das Erstellen von Klassifikationstabellen sind am Datenverarbeitungssystem Hilfsprogramme installiert. Da dies für die Themenstellung dieser Arbeit nicht relevant ist, wird auf die Hard- und Softwarestruktur nicht näher eingegangen und lediglich die Datenverarbeitungsstruktur kurz erläutert.

5.3.3.1 Bilddatenverarbeitung bei optischer Sortierung

Nach der in 5.3.2.1 beschriebenen Detektion und Bildaufnahme werden kontinuierlich pixelbasierte Abbildungen des Materialstroms von der Sensorik generiert und an die Datenverarbeitungseinheit übermittelt sowie von dieser weiterbearbeitet. Die wesentlichen Schritte sind vereinfacht im Ablaufschema Abbildung 47 dargestellt.

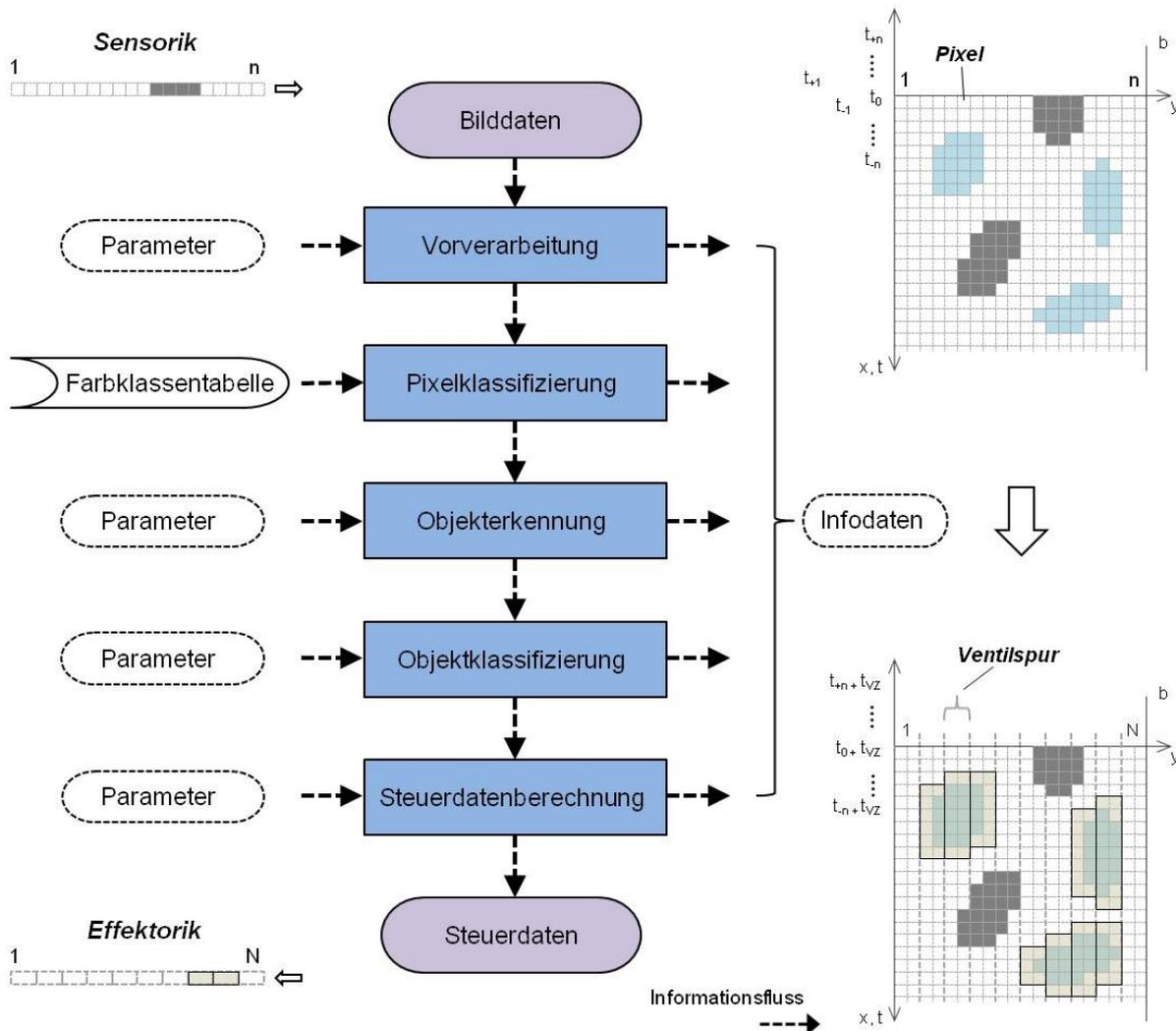


Abbildung 47: Bilddatenverarbeitung in der optischen Sortierung

In der Vorverarbeitungssequenz werden die Daten beispielsweise korrigiert, normiert oder gefiltert. In weiterer Folge werden die einzelnen Ortspixel durch Vergleich mit off-line eingelernten und erstellten Farbklassen- bzw. Lookup-Tabellen (LUT) klassifiziert. Basis der Merkmalsklassen können beispielsweise Intensitäts- oder Farbraumbereiche sein. Mittels klassischer Bildverarbeitungsmethoden und -algorithmen erfolgt anschließend eine örtliche Segmentierung, Objekterkennung und Ermittlung von Objektattributen wie der Größe, Form, Umfang, Flächenschwerpunkt, Struktur und Farbklassenverteilung. Im nächsten Schritt werden die Objekte entsprechend der Parametrierung und den ermittelten Objektattributen klassifiziert sowie den definierten Sortierklassen zugeordnet. Zum Abschluss werden die Steuerdaten wie Position, Impulsverzögerung und Impulslänge für die Trenneinheit bzw. Effektorik berechnet. Diese Steuerdaten werden im Weiteren an die Verstärkereinheit übertragen. Mit der sequenziellen Verarbeitung geht auch eine massive schrittweise

Datenreduktion einher. Leistungsstarke Datenrechnereinheiten sind in der Lage über eine Millionen Objekte je Minute zu bewerten.

5.3.3.2 Farbraum und Farbklassentabelle

Die mit Farbzeilensensoren gewonnenen RGB-Daten werden für die weitere Verarbeitung in einem geeigneten Koordinatensystem, dem sogenannten RGB-Farbsystem bzw. RGB-Farbraum, abgebildet. Der RGB-Farbraum bildet einen dreidimensionalen Würfel, dessen Koordinatenachsen den drei Primärfarben Rot (**R**), Grün (**G**) und Blau (**B**) entsprechen. Die RGB-Werte sind positiv und im Fall der optischen Sortierung zumeist auf den Wertebereich $[0, 255]$ bzw. 8 Bit beschränkt. Gegebenenfalls, wie in Abbildung 48 (a) dargestellt, wird auf ein Intervall $[0, 1]$ normiert (58).

Prinzip der additiven Farbmischung:

Das RGB-Farbschema basiert auf der additiven Kombination der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau, d.h. die Farbmischung erfolgt ausgehend von Schwarz durch Addition der einzelnen Komponenten. Man kann sich diese Farbmischung als Überlagerung von drei Lichtstrahlen mit den Farben Rot, Grün und Blau vorstellen. Sie sind in einem dunklen Raum auf ein weißes Papierblatt gerichtet und ihre Intensität kann individuell und kontinuierlich gesteuert werden. Die unterschiedliche Intensität der Farbkomponenten bestimmt dabei sowohl die Helligkeit als auch den Ton der resultierenden Farbe. Auch Grau und Weiß werden durch Mischung in entsprechender Intensität erzeugt (58). Die Raumdiagonale zwischen Schwarz $(0,0,0)$ und Weiß $(1,1,1)$ bildet dabei die sogenannte Unbunt-Achse.

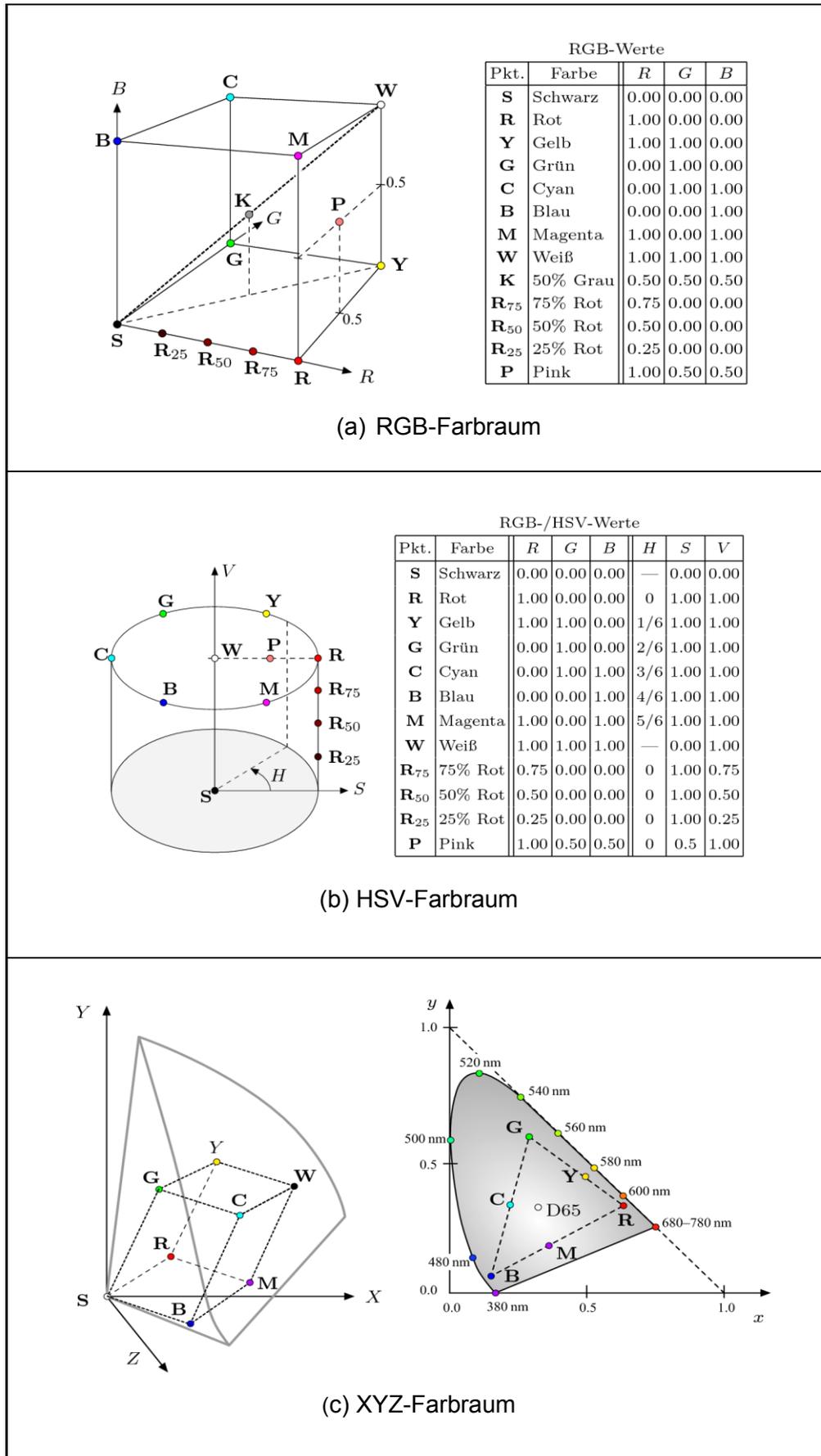


Abbildung 48: Verschiedene Farbraummodelle; Quelle: (58)

Neben dem RGB-Farbraummodell hat sich vor allem der HSV- Raum, wie in Abbildung 48 (b) abgebildet, für die farb-basierten Merkmalsklassenbewertung etabliert. Im HSV-Raum wird die Farbinformation durch subjektiv wichtige Farbeigenschaften wie Farbton (*Hue*), Sättigung (*Saturation*) und Helligkeit (*Value*) explizit dargestellt (58). Dies erleichtert die computer-basierte Darstellung von spezifischen Farbmerkmalen und interaktive oder automatisierte Definition von Farbklassen. In Abbildung 49 ist dazu beispielsweise ein Bildschirmplot einer HSV-Raumzuordnung mehrerer Glasscherben S1 bis S6 abgebildet. Zudem sind in der HS-Ebene beispielhaft zugeordnete Farbklassenbereiche mit sogenannten Pseudo- oder Falschfarben maskiert.

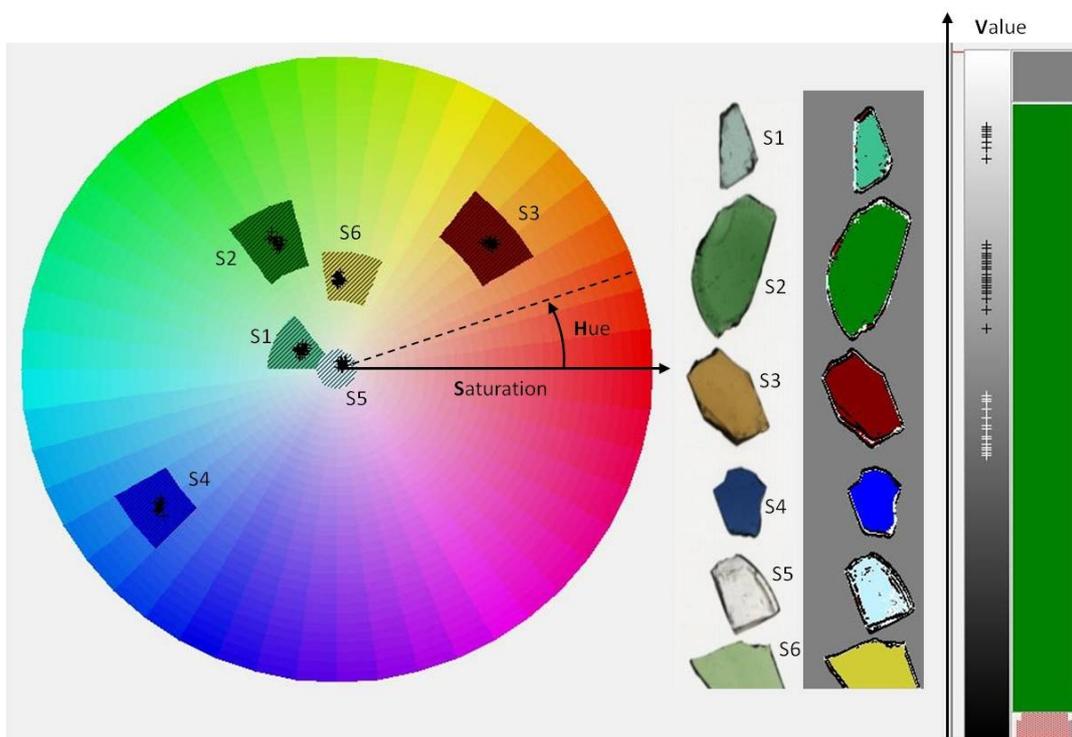


Abbildung 49: Beispiel für computerunterstützte Farbraumzuordnung⁴

Als Ergebnis eines Einlernprozesses mit Musteraufnahmen erhält man die für die Pixelklassifizierung eingesetzten Farbklassentabellen bzw. LUT. Bis zu 16 Farbraumbereiche mit zugeordneten HSV-Koordinaten können beispielsweise mit der eingesetzten Teachin-SW in einer LUT definiert und mit Pseudo- bzw. Falschfarben maskiert werden. Diese zumeist applikationsspezifisch unterschiedlichen Farbklassentabellen werden dann, wie in Abbildung 47 dargestellt, als Referenz zur Pixelklassifizierung verwendet.

⁴ Erstellt mit „Farb-Teach In“, Version: 4.39.2006.2, © by EVK GmbH

Für Anwendungen, die eine präzise, reproduzierbare und geräteunabhängige Darstellung von Farbe erfordern, wie bei der Digitalfotografie oder Ausgabe auf TV-Bildschirmen, wird oftmals der von der CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) standardisierte XYZ-Farbraum, wie in Abbildung 48 (c) dargestellt, verwendet. Dieser ist in der optischen Sortierung aber von untergeordneter Bedeutung. Zumeist ist nicht der visuelle Farbeindruck selbst wesentlich, sondern nur die relative Lage der RGB-Werte bzw. Farbwerte zueinander. Sehr wohl sind aber die Merkmalsklassen bzw. die diesen zugeordneten Farbraumbereiche auf die gerätespezifischen Abbildungseigenschaften zu kalibrieren. Bezüglich der Regeln für die Konversion von Farbwerten zwischen den Farbraumsystemen sei auf spezifische Literatur wie beispielsweise „Digitale Bildverarbeitung“ von W. Burger (58) verwiesen.

5.3.3.3 Fallbeispiel zur Bilddatenverarbeitung bei Glasscherbensortierung

Die unter 5.3.3.1 allgemein beschriebenen Bilddatenverarbeitungsschritte werden in Folge am Beispiel einer Glasscherbenapplikation erörtert.

In Abbildung 50 (a) ist dazu eine Materialbildsequenz (350 x 1000 Pixel), welche mit dem Sortiersystem CLARITY detektiert wurde, abgebildet. Jedes Pixel des abgebildeten Glasscherbenstromes wird entsprechend der hinterlegten LUT maskiert. Das Ergebnis der Farbklassenzuordnung ist in der entsprechenden Falschfarbendarstellung in Abbildung 50 (b) abgebildet. Starke Verunreinigungen, sehr dicke Objektbereiche oder un stetige Randbereiche können das Licht extrem stark absorbieren und werden rot eingefärbt bzw. als nichttransparent dargestellt. In Abhängigkeit der Objektlage, Falschfarbenverteilung und Gewichtungssparameter wird über Zwischenschritte jedes Objekt einer Merkmalsklasse zugeordnet und werden die Steuerdaten ermittelt. Diese sind mittels umschreibender Rechtecke in Abbildung 50 (c) visualisiert. Die Rahmenfarbe symbolisiert die Merkmalsklassenzuordnung des Objektes bzw. von Objektclustern. Sofern die Merkmalsklasse aktiv aussortiert werden soll, definiert die Seitenlänge in x-Richtung die Ventilanzahl und die Seitenlänge in y-Richtung die zu aktivierende Ventilanzahl.

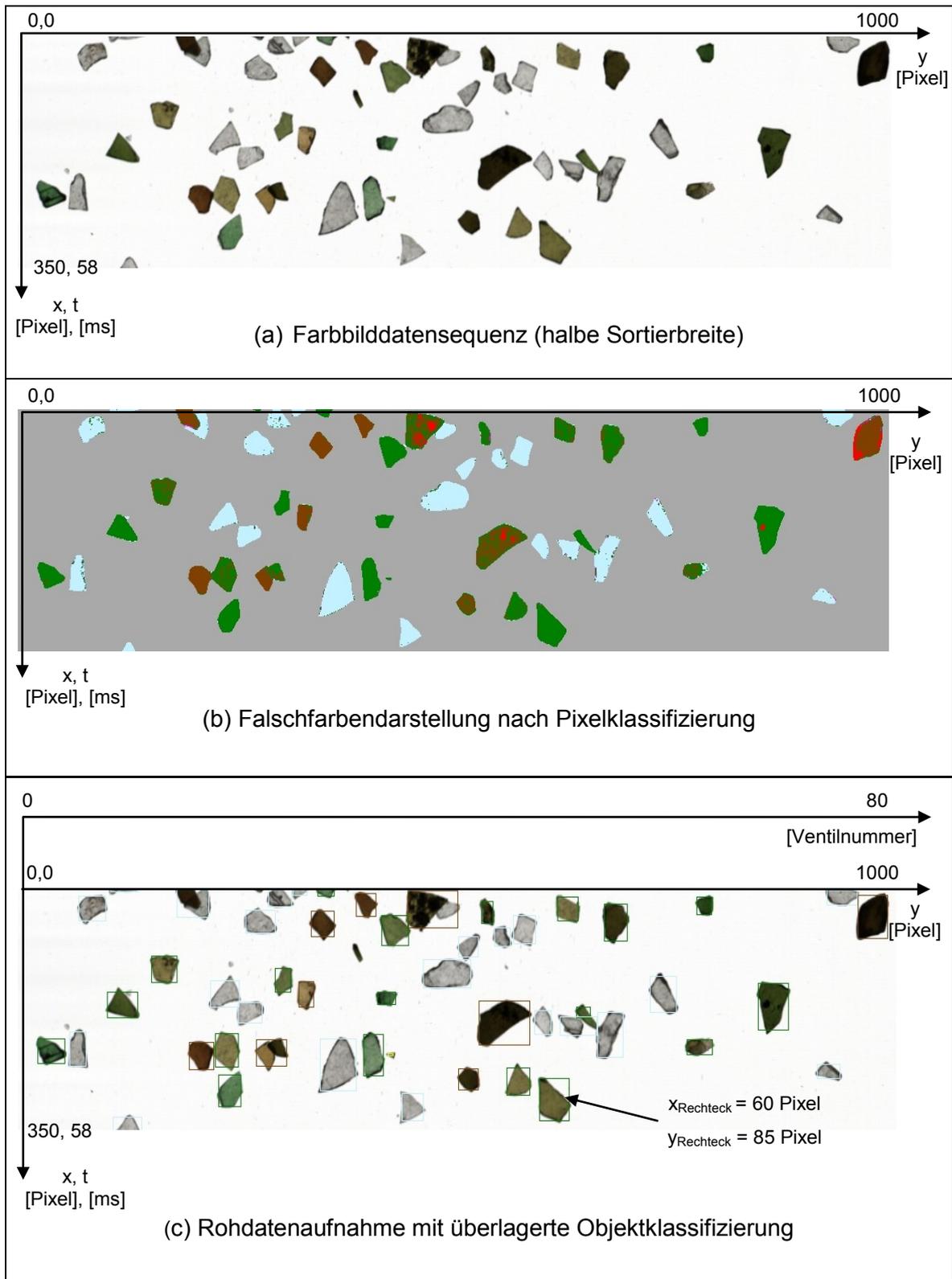


Abbildung 50: Fallbeispiel Glassortierung - Ergebnisse der Bildverarbeitungsschritte⁵

⁵ Erstellt mit „Clarity2“, Version: 2.6.0, © by Binder+Co AG

Ausgehend von einer Detektionskonfiguration, wie in 5.3.2.1 zur Ableitung der Abbildungsauflösung angesetzt wurde, ergibt sich beispielsweise nach (5.17) bei einer Rechteckseitenlänge in x-Richtung x_{Rechteck} von 85 Pixel bzw. Bildzeilen und einer Messfrequenz f_{Messung} von 6 kHz eine rechnerische Impulslänge t_{Impuls} von 14,2 ms.

$$t_{\text{impuls}} = \frac{x_{\text{Rechteck}}}{f_{\text{Messung}}} \quad (5.17)$$

Bei einer angenommenen Ventilanzahl von 160 Stück/m ergibt sich eine Ventilauflösung V_y von 6,25 mm/Ventil. Bei einer Rechteckseitenlänge in y-Richtung y_{Rechteck} von 60 Pixel und einer Abbildungsauflösung Y von 0,49 mm/Pixel werden nach (5.18) sechs benachbarte Ventile aktiviert.

$$N_{\text{aktive Ventile}} = \text{GANZZAHL} \left\{ \frac{Y * y_{\text{Rechteck}}}{V_y} \right\} \quad (5.18)^6$$

Falschfarbendarstellungen und/oder Rohdatenaufnahmen mit überlagerter Objektklassifizierung werden auch zur online Analyse und Kontrolle der Wirkweise eingesetzt sowie am MMI angezeigt.

5.3.3.4 Bilddatenverarbeitung bei einfachen Multisensorsystemen

Wie bereits erwähnt, werden vermehrt Multisensor-Sortierer eingesetzt. Die Signal- und Datenverarbeitung ist bei derartigen Systemen etwas komplexer und stellt Anforderungen insbesondere an die Ablaufsynchronisation. In Abbildung 51 ist dazu beispielsweise ein mögliches Ablaufschema für ein Multisensorsystem mit einer optischen (A) und einer induktiven Sensorik (C) zur Detektion von metallischen Objekten dargestellt. Die Zusammenführung der Steuerdaten für die Effektorik wird mittels logischer Verknüpfung durchgeführt. Dies erfolgt oftmals in der Verstärkereinheit, die bereits als Teil der Effektorik betrachtet werden kann.

⁶ Funktion GANZZAHL Rundet eine Zahl auf die nächst kleinere Zahl ab

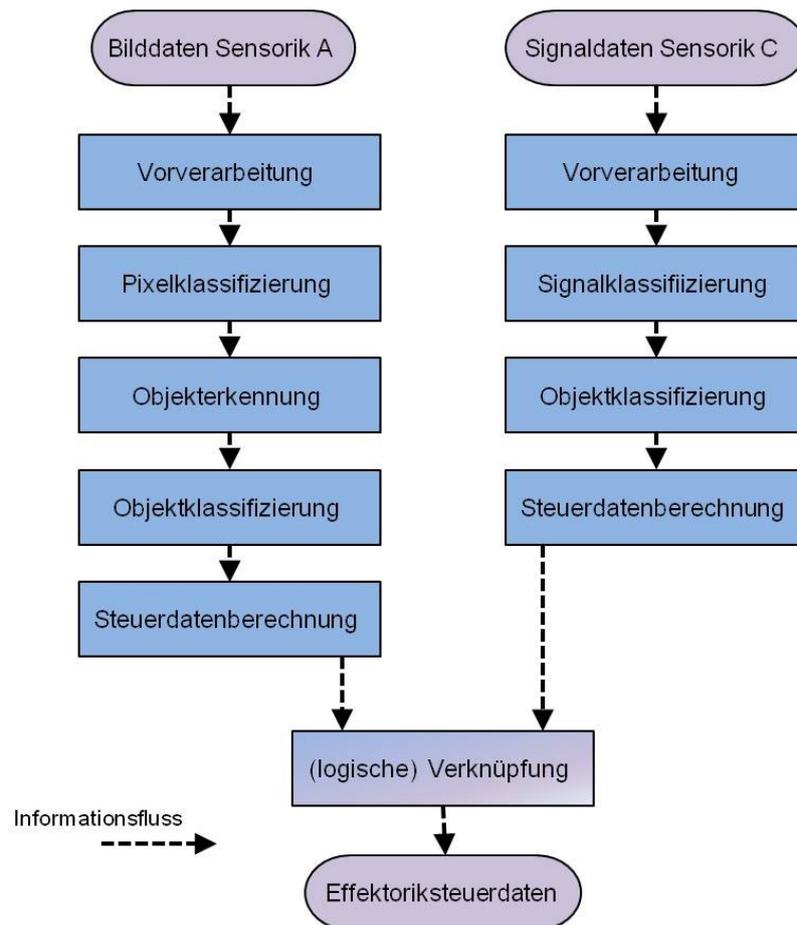


Abbildung 51: Datenverarbeitung bei Multisensor-Systemen

5.3.4 Effektorik

Die Effektorik besteht im Wesentlichen aus zwei Baugruppen: der Ansteuereinheit bzw. dem Verstärker und einem oder zwei eindimensionalen Array mit aneinandergereihten Aktuatoren quer zum Materialstrom (y -Achse) für die physikalische Objektrennung.

In speziellen Einsatzfällen, wie beispielsweise bei der Sortierung von Kartoffeln, wird die Trennung noch mittels pneumatisch bewegter Klappen durchgeführt (71). Diese kontaktbehaftete Technik wurde zu Beginn der Entwicklung der sensorgestützten Sortierung oftmals eingesetzt, ist aber durch eine lange Reaktionszeit, die große Baugröße und hohem Verschleiß gekennzeichnet. Neueste Entwicklungen, die die Aussortierung und Trennung mittels Industrieroboter durchführen, wurden vor kurzem am Markt präsentiert (72) und könnten zukünftig insbesondere für die Sortierung von größeren Teilen mit stark variierender Kontur wie ALU-Schrott oder Holzabfällen Verwendung finden.

Heutzutage erfolgt die physikalische Trennung der Objekte fast ausschließlich kontaktlos mittels Druckluftimpulsen, sprich direkt-pneumatisch. Als Aktuatoren werden Magnetschaltventile eingesetzt und derartige eindimensionalen Trennarrays werden auch als Sortierentilleisten bezeichnet.

In Abbildung 52 ist dazu beispielsweise eine Konstruktionsübersicht einer Sortiermaschine mit zwei Sortierentilleisten dargestellt. Die Sortierentilleisten sind gegenüber den Auswurfschächten und oberhalb der Trennkanten positioniert. Der Düsenmund ist nahe an der Fallparabel und so ausgerichtet, dass der Impuls eine maximale Ablenkung der Objekte bewirkt.

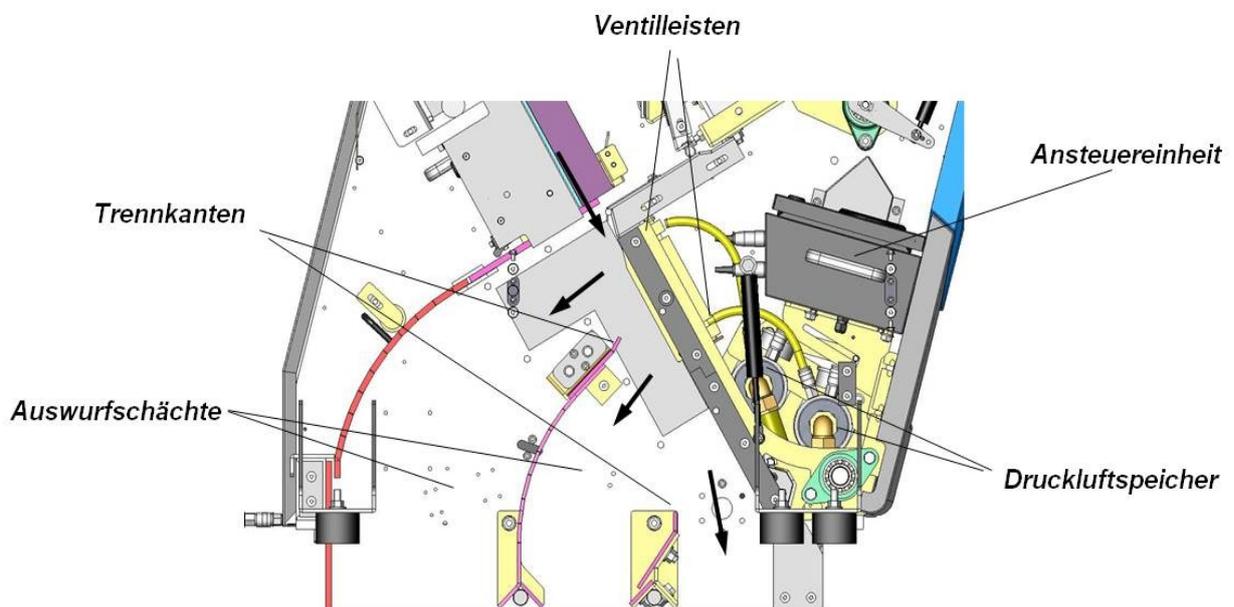


Abbildung 52: Effektorik mit 2 Ventilleisten; Quelle: Binder+Co AG

Jede Sortierentilleiste und deren Magnetschaltventile werden individuell angesteuert. Zur Ansteuerung der Magnetschaltventile wird eine speziell entwickelte Ansteuerelektronik und/oder ein SPS-System mit geeigneten schnellschaltenden Ausgangskarten eingesetzt. Mittels pulsweiten-modulierter Spannungsansteuerung (PWM) kann die Schaltfunktion optimiert und die elektrische Leistungsaufnahme minimiert werden. Mit der Anordnung in Abbildung 52 können zwei Auswurffractionen und eine Durchlauffraction hergestellt werden.

Die Sortierentilleisten sind oftmals aus kompakten Segmentmodulen, wie beispielsweise in Abbildung 53 dargestellt, aufgebaut. Je nach Maschinenbreite bzw. aktiver Sortierbreite werden entsprechend viele Module nebeneinander montiert.

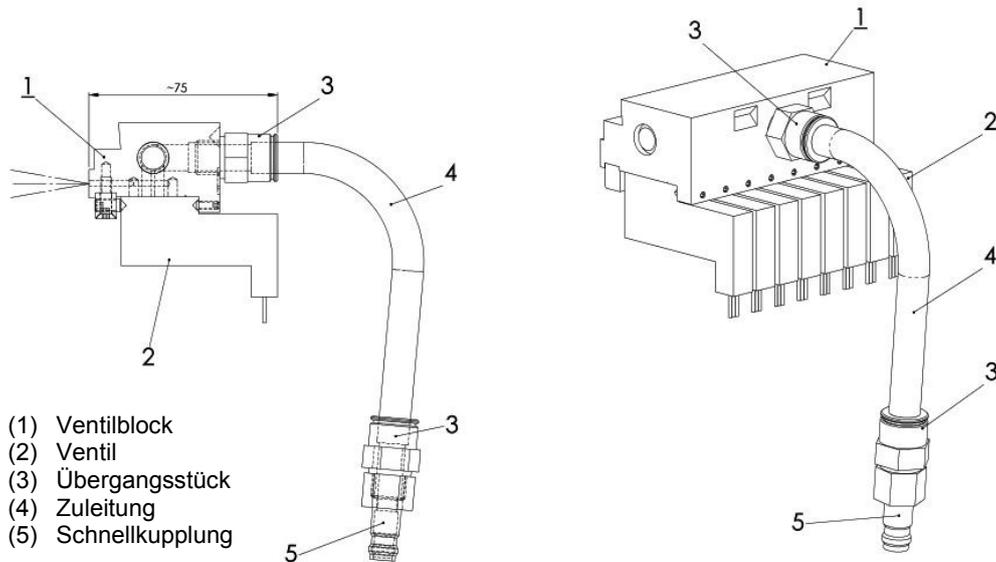


Abbildung 53: Sortierventilmodul 100mm breit und mit 8 Stk. Standardventilen; Quelle Binder+Co AG

Bis vor einigen Jahren wurden hauptsächlich handelsübliche Schaltventile aus der Automatisierungstechnik für die direkt-pneumatische Trennung der Objekte eingesetzt. Dabei sind durch die Bauart, Baugröße, nominale Durchflussmenge und mechanischer sowie elektrischer Trägheit Grenzen in der örtlichen Auflösung und der effektiven Schaltgeschwindigkeit gegeben. In einer intensiven Kooperation mit spezialisierten Zulieferanten und auf Basis von strömungstechnischen Berechnungen bzw. Simulation konnte eine neuartige Sortierventilmodul von Binder+Co AG entwickelt und patentiert (73) werden. In Abbildung 54 ist das Konstruktionskonzept anhand eines Sortierleistenmoduls mit 16 Zylinderspulen dargestellt.

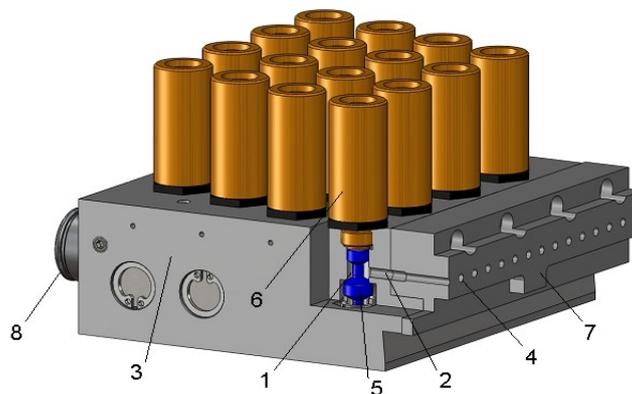


Abbildung 54: Sortierventilleistenblock 100m breit und mit 16 Zylinderventilen; Quelle: Binder+Co AG

Die Schaltkammern (1) und die vom Versorgungsanschluss (8) wegführenden Druckluftwege bzw. –leitungen sind in die Trägerkonstruktion (3) integriert. Speziell die Leitungsdistanzen (2) zwischen den einzelnen Schaltkammern und dem Düsenmund (4) sind minimal. Die Leitungsstruktur ist nach strömungstechnischen Gesichtspunkten optimiert. Die zylindrische Bauform des neu entwickelten elektromagnetischen Schaltelementes, bestehend aus Spulenkörper (6) und Ventilkolben (5), erlaubt bei dieser Anordnung eine extrem enge Positionierung und insgesamt einen kompakten Aufbau. Ventilspurabstände von wenigen Millimetern bei minimaler Reaktionszeit und hohem nominalen Durchfluss sind realisierbar. Zudem ist die Düsenleiste (7) aus verschleißfestem Material ausgeführt und die Ersatzteilkosten sind gering (53).

Die Eigenschaften und das Funktionsvermögen der Effektorik sind definiert durch Parameter und Kenndaten wie

- die pneumatische Reaktionszeit,
- die Impulsrate,
- die Impulskraft,
- die elektrische Leistungsaufnahme,
- die Packungsdichte bzw. Spurbreite und
- die Lebensdauer der Schaltelemente.

Neben der Konstruktion, insbesondere der Druckluftführung, wird die pneumatische Reaktionszeit durch das Schaltverhalten, wie in Abbildung 55 dargestellt, der eingesetzten Ventiltechnologie definiert. Die elektromagnetische und pneumatische Trägheit bewirkt eine Totzeit $t_{VZ\ Ventil}$ [ms] und einen verzögerten Druckanstieg t_{EZ} [ms] sowie –abfall t_{AZ} [ms] am Düsenmund. Nach (5.19) ergibt sich damit für die minimal erforderliche Steuerimpulslänge und die maximale theoretische Impulsrate $f_{steuer\ max}$ [Hz] je Ventilspur nach (5.20).

$$t_{impuls\ min} = t_{VZ\ Ventil} + t_{EZ\ Ventil} + t_{AZ\ Ventil} \quad (5.19)$$

$$f_{steuer\ max} = \frac{1}{t_{impuls\ min}} \quad (5.20)$$

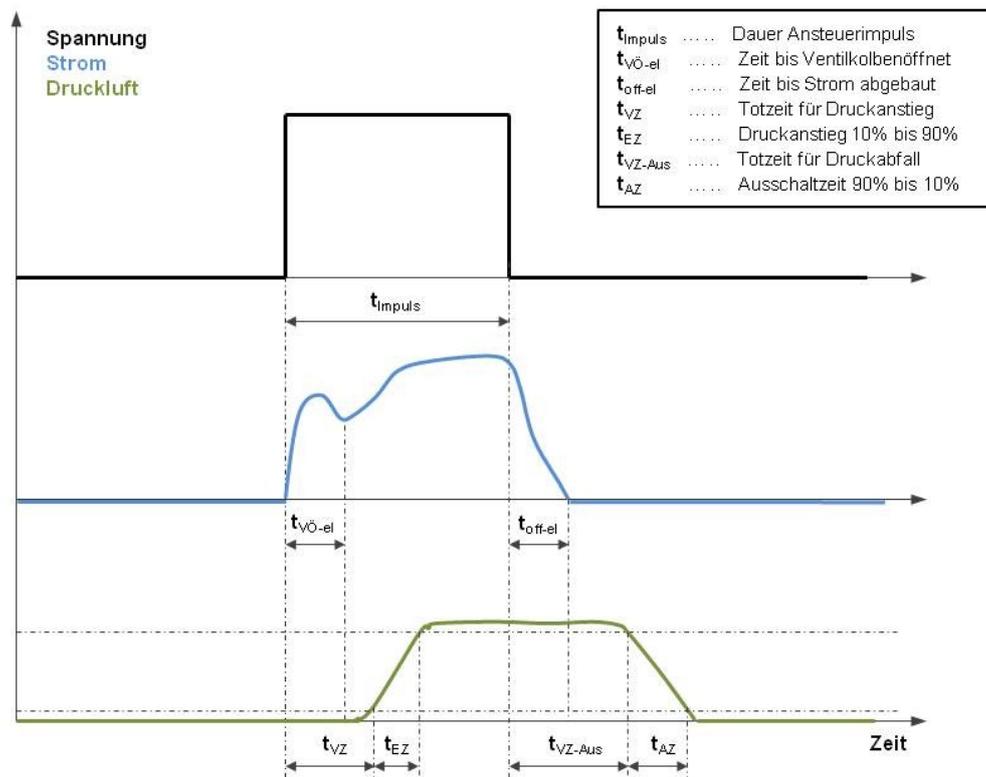


Abbildung 55: Schaltverhalten eines Magnetschaltventils

Der Ablenkvektor steht in Zusammenhang mit der Impulskraft, der Angriffsfläche, dem Objektgewicht und der Objektgeschwindigkeit. Die Impulskraft ist bestimmt durch den Staudruck $q \text{ [N/m}^2\text{]} = f(v^2)$ an der Objektfläche. Die Strömungsgeschwindigkeit $v \text{ [m/s]}$ ist wiederum eine Funktion von Arbeitsdruck und Düsenquerschnitt bzw. – geometrie.

War die elektrische Leistungsaufnahme in der Vergangenheit eher unbedeutend, ist diese insbesondere in Bezug auf thermischere Aspekte bei hohen Packungsdichten und Ventilanzahl, wie in Abbildung 54 dargestellt, relevant und sollte möglichst gering sein. Je nach Packungsdichte, aktiver Sortierbreite und Anzahl der Sortierleisten können bis zu 1 000 Sortierventile je Maschine verbaut sein. Die Sortierventile werden bedingt durch die hohen Impulsraten enorm beansprucht und sind die wesentlichen Verschleißteile sowie die bedeutendste Ersatzteilkostenposition. Im Betrieb kann die Aktivität bzw. Schlagzahl bis zu 750 [Impulse/min] je Ventil betragen. Die Lebensdauer ist als durchschnittliche Anzahl an Schaltzyklen bis zu einem Defekt definiert. Die Standzeit der Sortierventile im Betrieb ist primär von der Aktivität beeinflusst und variiert stark zwischen wenigen Monaten bis Jahren.

Um die große Bandbreite an zu sortierenden Materialien und Korngrößen effizient trennen zu können, werden die Sortiermaschinen mit unterschiedlichen Sortierleistenkonfigurationen ausgerüstet. Diese sind in Hinblick auf Ventilart, Ventilanzahl, Reaktionszeit und Impulskraft auf die Korngrößenbereiche abgestimmt. In Tabelle 13 sind aktuelle Modulkonfigurationen der Binder+Co AG und deren Spezifikationen zur Orientierung abgebildet.

| Kenndaten | Grob | Standard | Fein |
|---|--|---|--|
| Abbildung (Blockmodul 100mm breit) |  |  |  |
| Bezeichnung (Block) | V4 | V8, V12, V16 | V32 |
| Abbildung (Ventil) |  (74) |  |  |
| Ventiltyp/Hersteller | 52A-13-00A-DM- DDDJ-1 / Fa. MAC | MPVZ1018 / Fa. Binder+Co | MPVZ1042 / Fa. Binder+Co |
| Nenndurchfluss/Ventil (bei 6 bar) Φ [Nl/min] | 700 | 300 | 125 |
| Schaltzeit (Ein/Aus bei 2 bar) $t_{\text{Ein/Aus}}$ [ms] | 7,3/5,3 | 4,5/6,0 | 3,0/1,5 |
| Impulsrate/Ventil $f_{\text{steuer max}}$ [Hz] | 80 | 150 | 300 |
| Arbeitsbereich p/p_{max} | 4-10 | 3-7 | 1-6 |
| PWM-Ansteuerung | nein | nein | ja |
| elektr. Leistung/Ventil (Ein/Halten) P [W] | 12,7/- | 20,9/- | 48/9,6 |
| Lebensdauer/Ventil [Millionen Zyklen] | 200 | 250 | 500 |
| Ventilspurbreite [mm] | 25 | 12,5/8,33/6,25 | 3,125 |

Tabelle 13: Sortierventilmodule für unterschiedliche Kornbereiche und deren Spezifikation;
Quelle: (74), Binder+Co AG

6 Einsatz und -grenzen VIS-basierter Sortierung

Basis der Technologieentwicklungen, welche in dieser Arbeit beschrieben werden, sind die Erfahrungen und Erkenntnisse aus Versuchen und dem Einsatz von VIS-basierten Sortiersystemen der Binder+Co AG. Handelte es sich ursprünglich vorwiegend um die Aufbereitung von Sekundärrohstoffen wie Altglas-, Altpapier- oder Kunststofffraktionen, so hat sich dies in den letzten Jahren auch auf Primärrohstoffe wie Industriemineralien oder Salze ausgeweitet. Vor allem die sehr variierenden und lagerstättenabhängigen Rohguteigenschaften bei Primärrohstoffen führten, in Hinblick auf eine Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von optischen Sortiertechniken, zu einer systematischen Ergänzung der Versuchsreihen.

6.1 VIS-basierte Sortierung bei Binder+Co AG

Eines der ersten Maschinenbauunternehmen, die die Herausforderung seitens der Recyclingindustrie annahm und ihr klassisches Produktportfolio mit optischer bzw. VIS-basierter Sortierung erweiterte, war die in Gleisdorf ansässige Binder+Co AG. Ende der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts wurde ein erster Sortierer mit gepulster infrarot LED-Beleuchtung und monochromen Fotodioden als Sensoren entwickelt (75). Diese Sortierer wurden in der Altglasaufbereitung zur Aussortierung von glasfremden Störstoffen wie Keramik, Stein und Porzellan (KSP) eingesetzt. Nach der Installation der ersten Prototypen in Altglasaufbereitungsanlagen wurde diese Technik weiterentwickelt und bis zu Beginn dieses Jahrtausends über 700 Module davon weltweit installiert. Daraus entstand ein eigener Unternehmensbereich „Umwelttechnik“ mit Fokus auf die Sekundärrohstoffaufbereitung. 1998 wurden die ersten Sortiersysteme mit VIS-Sensorik basierend auf Smart-Kameratechnologie, zur Sortierung von Altglasscherben nach deren Transmissionsfarbe und Abtrennung von KSP, installiert. Diese VIS-Sensorik wurde auch 2002 im ersten Bandsortiersystem zur Trennung von Altpapier und Karton eingesetzt. Um 2006 wurde eine leistungsstärkere VIS-Sensorik mit externer Signal- und Datenverarbeitungseinheit als Basis der weiteren Produktinnovationen entwickelt. In Anhang B sind dazu die technischen Evolutionsschritte über nahezu dreißig Jahre anhand von Altglassortierern der Binder+Co AG mit technischen Kenndaten abgebildet.

Ein erster optischer Sortierer für die Industriemineralienaufbereitung wurde bereits 1996 entwickelt, aber nur einmalig in einer österreichischen Talkaufbereitungsanlage zur Weißegradsteigerung installiert (76). Das Interesse an sensorgestützter Sortierung war lange Zeit seitens der Bergbauindustrie und den Aufbereiter von Primärrohstoffen gering. Der sich ändernden Nachfrage Rechnung tragend, wurde 2011 ein spezifisch für den Einsatz in der

Aufbereitung von primären Rohstoffen entwickelter Sortierer mit VIS-Sensorik auf den Markt gebracht und zu einer eigenen Produktlinie ausgebaut (77).

Die Binder+Co AG hat sich insbesondere auf modular aufgebaute Rutschensortierer spezialisiert. Die Produktlinien CLARTY® und MINEXX® mit VIS-basierter Sensorik repräsentieren das Ergebnis der zwanzigjährigen technischen Evolution. Das Grundkonzept ist auf die Einsatzanforderungen wie

- hoher Durchsatz,
- hohe Sortiereffizienz,
- geringer Betriebsmittelverbrauch,
- lange Standzeit der Komponenten,
- vielfältige wechselnde Sortieraufgaben und
- raue Einsatzumgebung

abgestimmt.

Im Folgenden wird auf die relevanten optischen Rutschsortiersysteme eingegangen.

6.1.1 CLARITY®

Das Sortiersystem CLARITY® wird überwiegend in der Aufbereitung von Altglasscherben und vereinzelt für die Sortierung von Steinsalz und PET-Flakes eingesetzt. In Abbildung 56 ist der Maschinenaufbau eines vollausgerüsteten Systems mit zwei Abweisewegen und ein einfaches Konzeptschema mit einem Abweiseweg dargestellt. In Tabelle 14 sind repräsentative technische Daten für unterschiedliche Ausführungsvarianten angegeben. Etwa 500 Stück dieses Maschinentyps sind weltweit seit 2007 installiert worden und in Betrieb.

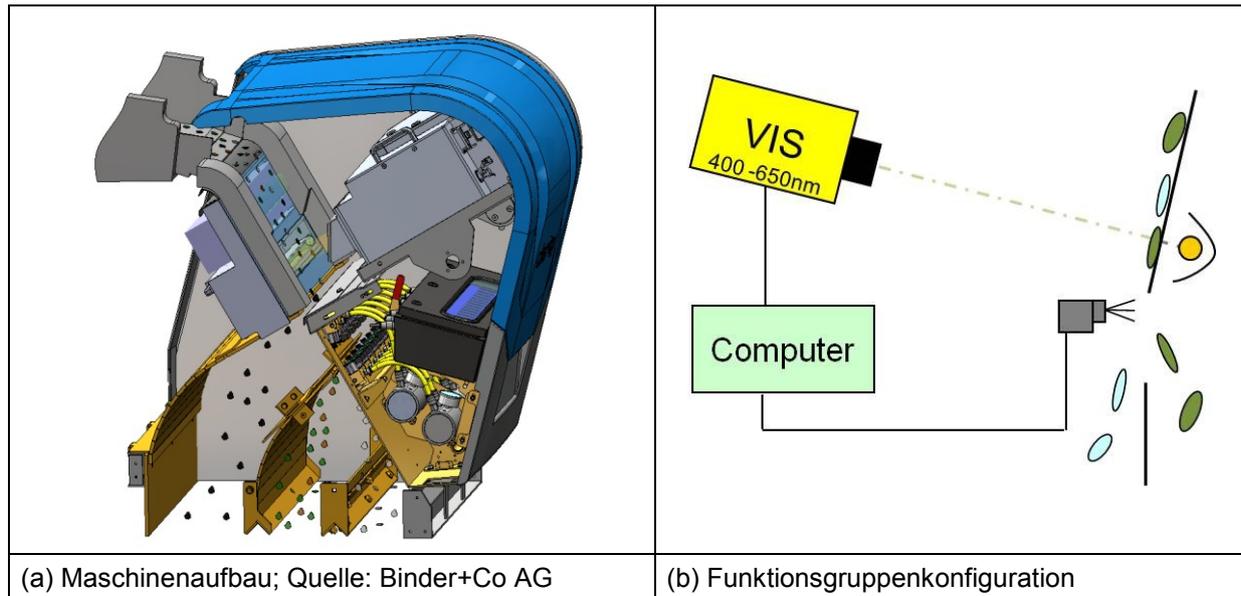


Abbildung 56: Sortiersystem CLARITY®

| Kennwerte / CLARITY® | technische Daten | Einheit |
|--|---|----------|
| Sortierbreite | 700/1000/1400 | mm |
| Produktwege | 2/3 | |
| Korngrößenspanne ($d_{\min}/d_{\max} < 3$) | 2 – 50 | mm |
| Durchsatz (z.B.: Altglas, 25-50mm) | 7/10/14 | t/hm |
| Trennkapazität (bezogen auf Durchsatz) | ~ 30 | % |
| effektorische Auflösung (x-, y-Achse) | 5x3,125 / 5x6,25 / 10x8,33 / 10x12,5 | mm |
| optische Sensorik | RGB- Zeilenkamera/Leuchtstoffröhre; einseitige Beleuchtung | |
| örtliche optische Auflösung | 0,25x0,25 / 0,6x0,6 | mm/Pixel |
| Klassifizierungsmerkmale | Transmission: Intensität, Farbe, Struktur (2D), Geometrie (2D) | |
| induktive Sensorik (Option) | Sekundärfeld-Induktionsleiste | |
| örtliche induktive Auflösung | 1,5x12,5 | mm |
| Klassifizierungsmerkmale | magnetische Suszeptibilität, elektrische Leitfähigkeit | |

Tabelle 14: Technische Daten – CLARITY®; Quelle: Binder+Co AG

6.1.2 MINEXX®

Das Sortiersystem MINEXX® wird überwiegend in der Aufbereitung von Industriemineralen und vereinzelt für die Sortierung von Sekundärrohstoffen wie Bauschutt und Kunststoffe aus Elektroaltgeräten eingesetzt. In Abbildung 57 ist sowohl der Maschinenaufbau eines vollausgerüsteten Systems mit einem Abweisweg und das zugrundeliegende Konzeptschema

dargestellt. In Tabelle 15 sind repräsentative technische Daten für unterschiedliche Ausführungsvarianten angegeben. Etwa 20 Stück dieses Maschinentyps sind weltweit seit 2011 installiert und in Betrieb genommen worden.

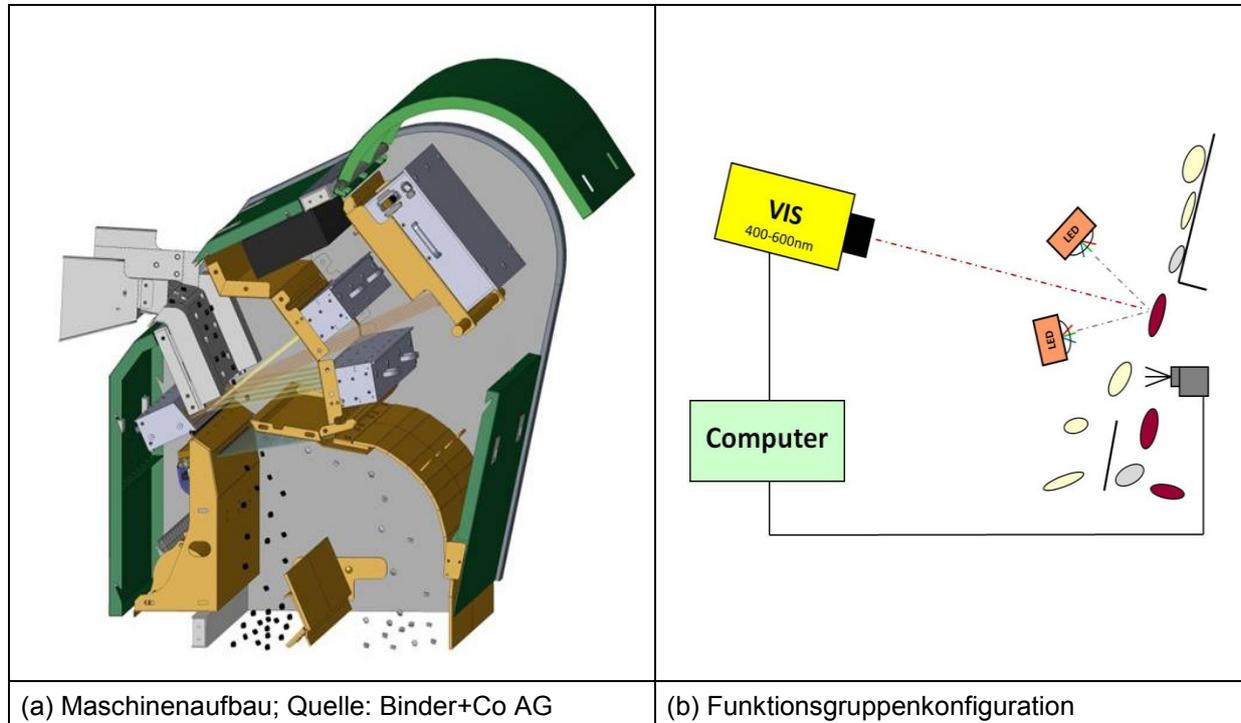


Abbildung 57: Sortiersystem MINEXX®

| Kennwert / MINEXX | technische Daten | Einheit |
|--|--|----------|
| Sortierbreite | 1000/1300 | mm |
| Produktwege | 2 | |
| Korngrößenspanne ($d_{\min}/d_{\max} < 3$) | 3 – 150 | mm |
| Durchsatz (z.B.: Quarz, 20-60mm) | 45/60 | t/hm |
| Trennkapazität (bezogen auf Durchsatz) | ~40 | % |
| effektorische Auflösung (x-, y-Achse) | 5x6,25 / 10x8,33 / 10x12,5 / 15x25 | mm |
| optische Sensorik | RGB- Zeilenkamera/LED-Line, einseitig/doppelseitig | |
| örtliche optische Auflösung | 0,25x0,25 / 0,6x0,6 | mm/Pixel |
| Klassifizierungsmerkmale | Reflexion, Remission und Transmission: Intensität, Farbe, Struktur (2D), Geometrie (2D) | |
| induktive Sensorik (Option) | Sekundärfeld-Induktionsleiste | |
| örtliche induktive Auflösung | 1,5x12,5 | mm |
| Klassifizierungsmerkmale | magnetische Suszeptibilität, elektrische Leitfähigkeit | |

Tabelle 15: Technische Daten – MINEXX®; Quelle: Binder+Co AG

6.2 Voraussetzung für den Einsatz optischer Sortierung

Eine klare Definition der qualitätsrelevanten Material- bzw. Merkmalsklassen und Zuordnung von Eigenschaftsgrenzen ist grundsätzlich Voraussetzung für die trenntechnische Lösungsfindung. Zudem muss für die spezifisch festgelegten Materialklassen die Wirkung auf die Produktqualität und –kennwerte bekannt sein.

Bei klassischen optischen Sortierern erfolgt die Trennung auf Basis der identifizierten Oberflächen- und/oder Transmissionsfarbe sowie geometrischer Objektattribute im sichtbaren bzw. visuellen Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm. Für die Eignungsprüfung dieser VIS-basierten Sortierung sind drei Aspekte bezüglich des Systems Aufgabegut-Sortierer wesentlich (78):

- Die definierten Material- bzw. Qualitätsklassen müssen mit deren farblichen Ausprägungen bzw. Farbunterschieden korrelieren.
- Die von den einzelnen optischen Merkmalsklassen besetzten Farbraumbereiche müssen isoliert voneinander sein und die farbliche Auflösung des Sortiersystems hinreichend hoch um diese zu detektieren.
- Die örtliche Auflösung der Sensorik muss hinreichend in Bezug auf die rohutspezifischen Verwachsungsverhältnisse sein.

Der erste Aspekt bezieht sich primär auf das Verhältnis von physikalischen oder/und chemischen Rohgut- bzw. Aufgabeguteigenschaften zu optischen Eigenschaften im VIS-Bereich. Sofern nicht optische Eigenschaften wie die Farbe der Einzelobjekte selbst mit der Produktqualität verknüpft sind, spricht man von einer indirekten Merkmalsklasseneigenschaft als Trennkriterium. Die Korrelation muss wie immer bei der Nutzung indirekter Trennkriterien etwa durch chemische oder physikalische Analysen der optischen Merkmalsklassen abgesichert werden.

Des Weiteren muss auch der Aufschlussgrad zur Erzielung hoher Trenngüten hinreichend gegeben sein. Insbesondere aber ist im Fall der optischen Sortierung zu beachten, dass die Ergebnisse der zweidimensionalen Oberflächendetektion repräsentativ für die dreidimensionalen Verwachsungsverhältnisse sind. Gulas hat in (76) den Zusammenhang von Remissionswerten einzelner Talkkörner und deren Mahlprodukten eingehend untersucht. Es konnte für die untersuchte Rohgutart eine Korrelation zwischen der Oberflächenremission einzelner Objekte und dem Weißegrad der daraus gewonnenen Mahlprodukte nachgewiesen werden.

Der zweite und dritte Aspekt bezieht auch stark die Sensorik als Messmittel und die Bildauswertung mit ein. Die Abbildungsdaten müssen eine entsprechende digitale Auflösung und gewisse statistische Charakteristik aufweisen um die Voraussetzungen zu erfüllen.

Mathematisch ausgedrückt, müssen die Merkmalsklassenbereiche MK_i entsprechend der ersten Bedingung mit den Material- bzw. Stoffklassen S_i korrelieren (6.1).

$$S(i) \cong MK(i) \quad (6.1)$$

$i...$ Stoff- bzw. Merkmalsklassenindex, $i \in [1...N]$

Bezüglich der Abbildung der optischen Eigenschaften gilt für eine Abbildungsdatenmenge A mit Intensitäts- oder Farbwerten x_d im Bereich $x_d \in [0, K-1]$, dass die Häufigkeitsverteilung $H(k)$ mit den Werten $h(k)$ (6.2) ausgeprägte Häufungsbereiche, mit möglichst großen Abständen zueinander und kleinen Minimumwerten dazwischen, aufweisen muss. Diese dienen als Grundlage für die Festlegung der Klassengrenzen dienen.

$$h(k) = \text{die Anzahl der Objekte mit dem Merkmalswert } k \quad (6.2)$$

$d...$ Index der Einheiten einer Datenmenge, $d \in [1...D]$

$k...$ Messwertindex, $k \in [0...K-1]$

Die Merkmalsklassen sind für sich betrachtet durch eine geringe Streuung bzw. Standardabweichung s nach (6.3) vom Merkmalsklassenmittelwert \bar{u} nach (6.4) gekennzeichnet.

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_d - \bar{u})^2}{D}} \quad (6.3)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{D} \sum x_d \quad (6.4)$$

Im Idealfall, wie in Abbildung 58 für ein Zweiklassensystem mit Normalverteilungen vereinfacht grafisch dargestellt, überlappen sich die detektierten klassenspezifischen Intensitäts- oder Farbwertverteilungen nicht. Eine Fraktion mit dieser Verteilungscharakteristik ist gut trennbar (79).

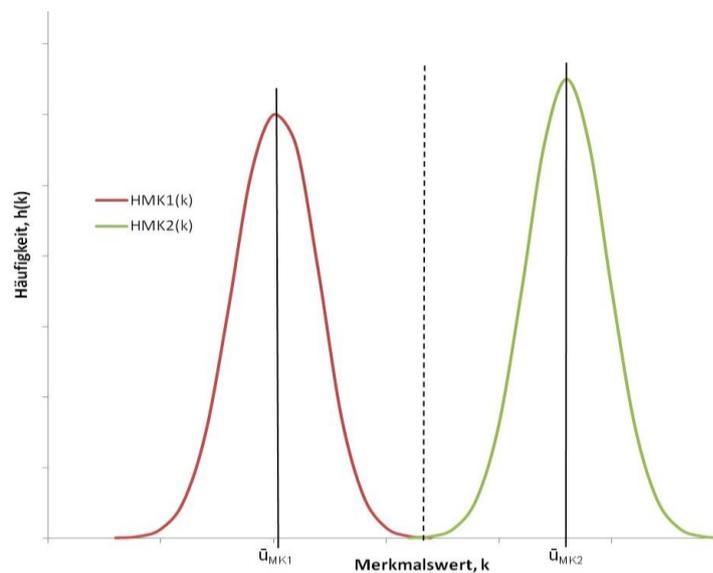


Abbildung 58: Günstige Häufigkeitsverteilung für ein System mit zwei Merkmalsklassen

Geringe Abstände der Mittelwerte \bar{u}_{MK1} und \bar{u}_{MK2} und/oder große Streuung der klassenspezifischen Intensitäts- oder Farbwerte führen, wie in Abbildung 59 dargestellt, zu ausgeprägten Überlappungsbereichen (grau). Eine Körnermenge mit dieser Verteilungscharakteristik ist nicht gut trennbar (79), da es Merkmals- bzw. Messwertbereiche gibt, die nicht eindeutig zu zuordnen sind.

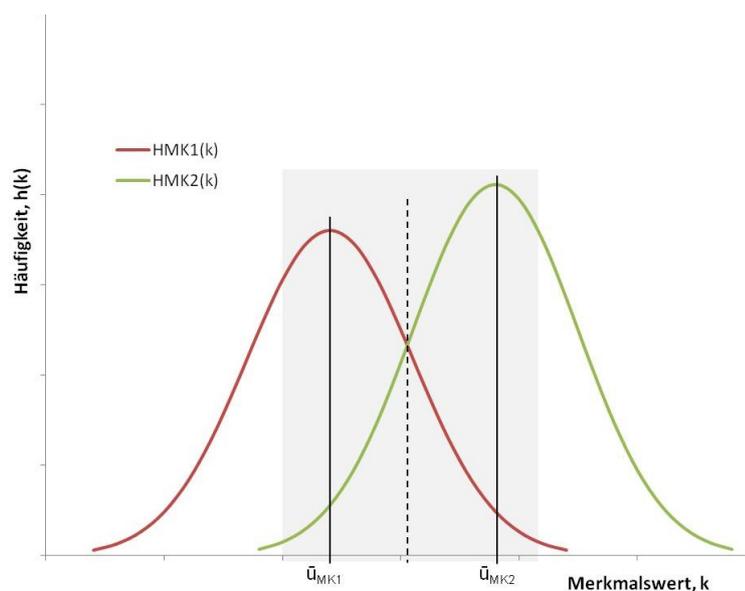


Abbildung 59: Ungünstige Häufigkeitsverteilung für ein System mit zwei Merkmalsklassen

In Abbildung 60 ist als einfaches praktisches Beispiel die Häufigkeitsverteilung der transmittierten Grau- bzw. Intensitätswerte $k \triangleq \text{Value}_{\text{HSV}}$ einer blauen, grünen und braunen Glasscherbe aufgetragen. Sofern die Intensität selbst die Materialqualität definiert, ist die gemessene Intensitätseigenschaft ein direktes Merkmal. Die oben angeführten Verteilungsbedingungen sind erfüllt und wären in diesem Beispiel auch für eine gemischte Körnermenge $\sum S(i)$ gültig. Die Klassifizierung basierend auf Grauwertbereichen ist prinzipiell möglich.

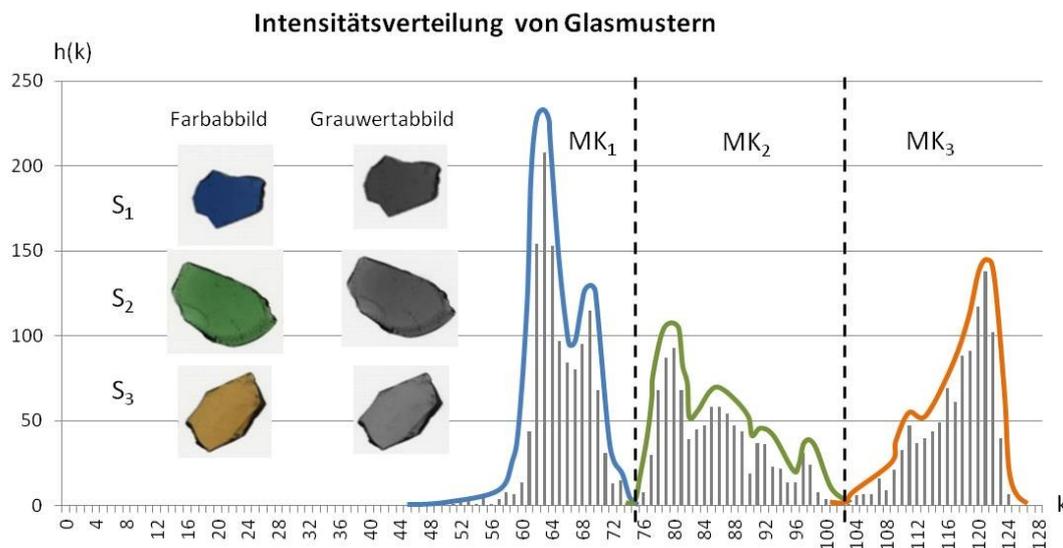


Abbildung 60: Häufigkeitsverteilung der Intensitätswerte $k \triangleq \text{Value}_{\text{HSV}}$ von Glasscherben, detektiert mit CLARITY

Die Abbildungsdatenmengen mit Farbvektoren $x_d = [x_R, x_G, x_B]$ im Bereich $x_R, x_G, x_B \in [0, K-1]$, wie sie bei der RGB-Farbemessung anfallen, werden, wie in 5.3.3.2 beschrieben, in geeignete Farbraummodelle umgerechnet und eingetragen. Die Farbverteilung muss, wie in Abbildung 61 für S_1 , S_2 und S_3 dargestellt, räumliche bzw. dreidimensionale nicht überlappende Häufungsbereiche mit möglichst großen Abständen zueinander aufweisen. Die überlagerten Ellipsoide skizzieren mögliche Klassenbereiche.

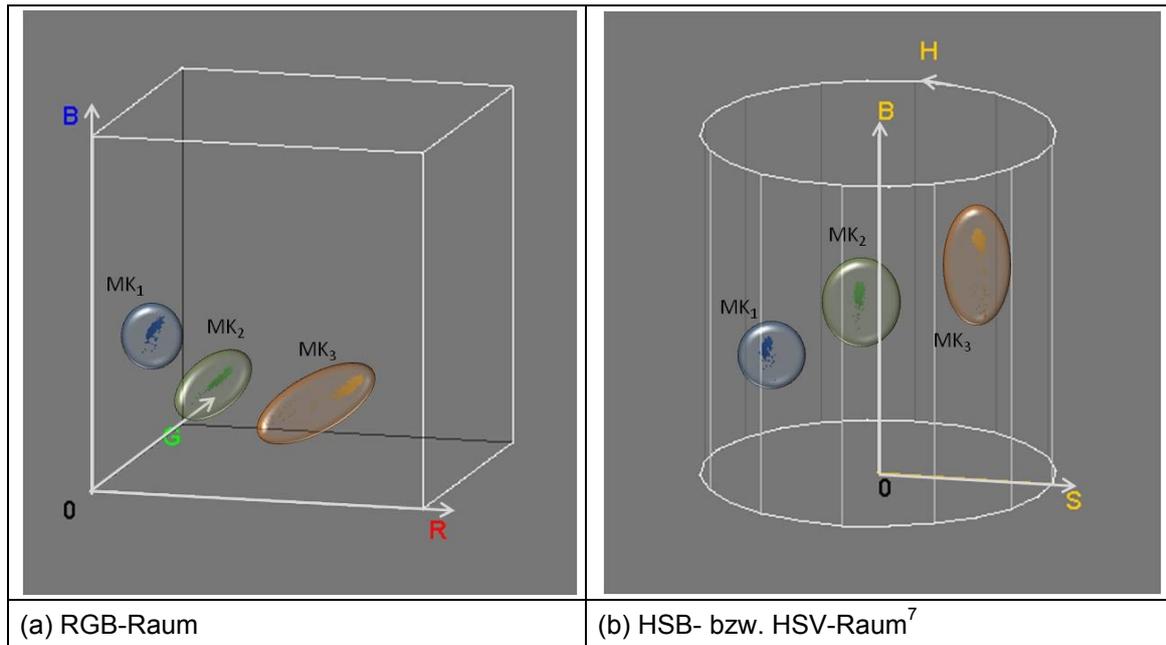


Abbildung 61: Farbverteilung der Musterscherben S1, S2 und S3 mit Klassenbereichen in verschiedenen Farbräumen

Die hohe örtliche Auflösung, welche die Abbildung der oberflächlichen Verwachsungsverhältnisse ermöglicht und beispielsweise zur Ableitung von Gehaltseigenschaften herangezogen wird, ist die Stärke der optischen Sensoren im Vergleich zu vielen anderen Techniken. Es lassen sich auch kleine Einschlüsse oder Störstoffteile identifizieren. In Abbildung 62 ist dazu beispielsweise das RGB-Intensitätsprofil einer Detektionszeile aus einer Drahtglasscherbenabbildung dargestellt. Der Draht von ca. 500 μm ist auch im Intensitätsprofil deutlich erkennbar.

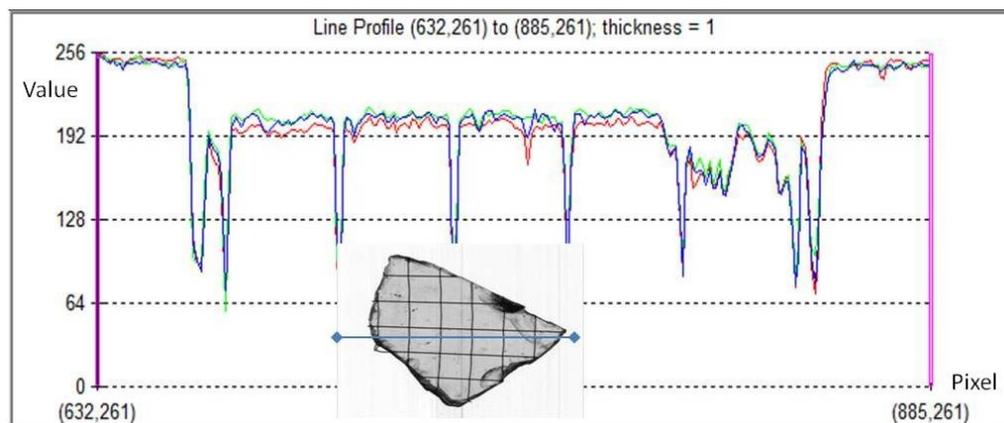


Abbildung 62: Einschussdetektion mit örtlicher Auflösung in x-Richtung von 0,2 mm/Pixel

⁷ B...Brigtness im HSB-Raum entspricht V...Value im HSV-Raum

6.3 Praktische Vorgangsweise bei Machbarkeitsuntersuchungen

Anlagenausrüster wie die Binder+Co AG beziehen sich bei Machbarkeitsprüfungen bzw. Validierungsverfahren üblicherweise fokussiert auf das aktuelle eigene Produktportfolio und das vorhandene Erfahrungswissen. Für eine positive Eignungsprüfung ist die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der verfügbaren Technik wesentlich. Die unter 6.1.1 und 6.1.2 beschriebenen Systeme verfügen auf Grund der modularen Grundkonzeptionierung bereits über erhebliche Freiheitsgrade bezüglich Detailkonfiguration, etwa bei der Beleuchtungstechnik oder der Bilddatenauswertung. Vor Beginn der systematischen Forschungs- und Entwicklungsarbeit war der in Abbildung 63 dargestellte Prozess bei Binder+Co AG etabliert und kann wohl als sehr typisch im Vergleich zu anderen Unternehmen angesehen werden.

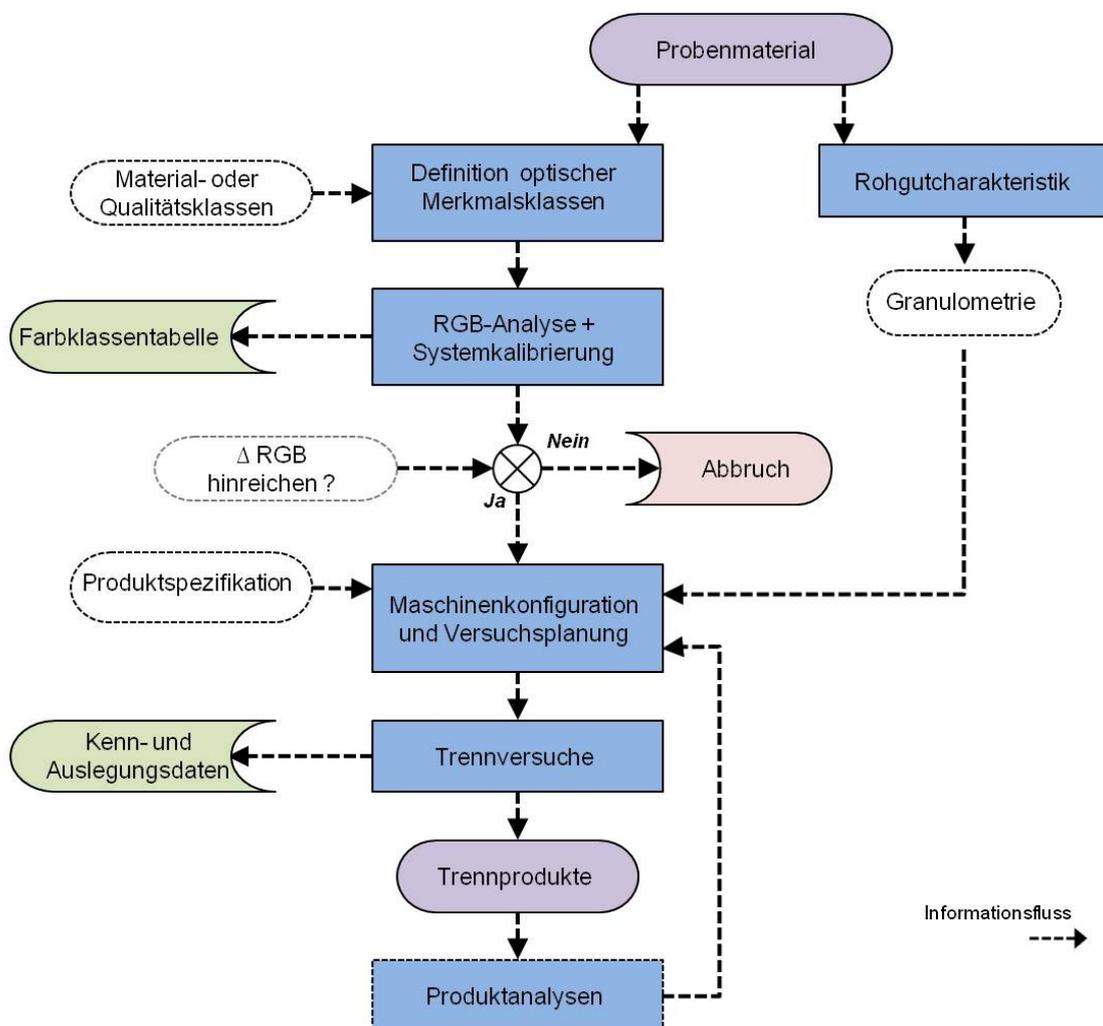


Abbildung 63: Machbarkeitsuntersuchung bei Binder+Co AG - Ablaufschema

Die Eignungsprüfung erfolgt direkt auf optischen Sortierern vom Typ CLARITY und MINEXX im Technikum des Unternehmens. Dazu werden unter Berücksichtigung der extern

vorgegebenen Material- bzw. Qualitätsklassen Farbmerkmalsklassen definiert und repräsentative Musterstücke ausgewählt. Am Sortierer werden diese Referenzmuster gescannt und die Farbverteilung der Objektabbildungen im RGB- oder HSV-Farbraum mittels sogenannter Teachin-Software analysiert. Des Weiteren wird interaktiv oder automatisch eine sortiergutspezifische Farbklassentabelle erstellt. Erscheint die sensorische Differenzierung gegeben, so werden unter Einbeziehung der Granulometrie und der Produktziele

- die Verschaltung der Sortiermaschinen,
- die Sortieraufgaben an den einzelnen Prozesspositionen,
- die Ausrüstung und Parametrierung der Sortiermaschinen und
- das Versuchsprozedere

definiert.

Sofern zur Verfahrensabsicherung erforderlich, werden die Trennaufgaben mittels Chargenversuchen simuliert und Produktmuster hergestellt. Diese werden extern oder intern analysiert und evaluiert. In Interaktion mit dem Interessenten werden unter Einbeziehung der Trenn- bzw. Analyseergebnisse gegebenenfalls das Konzept und/oder die Parametrierung der Sortiermaschinen angepasst sowie die Prozedur wiederholt.

Mit den Methoden für die Kennwertermittlung aus 5.1.1 kann unter Berücksichtigung der Produktspezifikationen dann auch die Einsatztauglichkeit abgeschätzt und bewertet werden. Die Auswertungsergebnisse sind Basis für softwareunterstützte Simulationen zur Bewertung der Wirkung von Schwankungen hinsichtlich der Rohgutqualität, komplexer Aufbereitungsverfahren sowie die Ermittlung von garantierbaren Betriebs- und Qualitätsparametern.

6.4 Fallbeispiele

Anhand von Fallbeispielen sollen im Folgenden die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen der oben angeführten Sortiertechniken erörtert werden. Die Versuchsreihen und -auswertungen wurden überwiegend im Technikum der Binder+Co AG durchgeführt und teilweise durch Anlagenversuche sowie Einsatzerfahrungen ergänzt. Die Testsysteme entsprechen bezüglich der Ausführung den Seriensystemen und wurden erforderlichenfalls den jeweiligen Applikationsanforderungen, dem technischen Stand entsprechend, angepasst.

6.4.1 Altglassortierung

Bei der Aufbereitung von Altglas sind optische Sortierer die wesentlichen Trennaggregate. In den letzten 25 Jahren wurden weltweit hunderte Aufbereitungsanlagen mit unterschiedlich komplexen und teilweise sehr spezifischen Prozessstrukturen installiert. In Anhang D sind dazu beispielhaft Prozessstrukturvarianten unterschiedlicher Komplexität dargestellt. Das Verfahren ist grundsätzlich zweigeteilt. Der erste Teil des Verfahrens beinhaltet eine zumeist mehrstufige Vorbehandlung, die in modernen Anlagen nahezu alle in 5.1.2 angeführten Konditionierungsschritte und Trennaggregatarten umfassen kann. Es folgt danach erst die ebenfalls zumeist mehrstufige sensorgestützte Trennung und die Anreicherung von Materialklassen, in denen, insbesondere die optischen Sortierer, in unterschiedlicher Funktion eingesetzt werden. Die Scherbenarten und -eigenschaften sowie Produktziele definieren die Verschaltung, positionsabhängige Ausrüstung und Parametrierung der Sortiersysteme.

Das aufzubereitende Altglas stammt üblicherweise aus kommunaler oder gewerblicher Sammlung und variiert in der stofflichen und farblichen Zusammensetzung doch erheblich. Man unterteilt die Altglasscherben nach Art der wesentlichen Produktbestandteile in Hohlglas, Flachglas, TV-Glas oder gemischte Fraktionen. Wie auch in Abbildung 64 erkennbar ist, sind die Fraktionen unterschiedlich stark mit glasfremden Stoffen kontaminiert. Des Weiteren fallen Fraktionen wie Mühlverbrennungsschlacke oder Restschwerfraktionen mit hohem Glasanteil bei Müllaufbereitungsprozessen, die zunehmend der stofflichen Verwertung zugeführt werden, an.



Abbildung 64: Diverse Altglasfraktionen mit Verunreinigungen

6.4.1.1 Konditionierung

Eine besondere Problematik in der Altglasaufbereitung stellt die hohe Schwankungsbreite der Eingangsqualitäten der aufzubereitenden Altglasscherben dar. Bedingt durch unterschiedliche Sammelsysteme, Transport und Lagerung ergeben sich nicht nur regionale, sondern vor allem auch jahreszeitliche bzw. witterungsbedingte Unterschiede. Besonders der Feuchtegehalt und

der Verrottungsgrad organischer Störstoffe führen zu ineffizienter Funktion der Vorbehandlung bzw. Konditionierung (Siebung, Sichtung, etc.) und zu extremer Verunreinigung der zu sortierenden Scherben. Die Scherben sind mit Haftkorn, feuchter Organik und anhaftenden Etiketten verunreinigt. Einerseits wurde in der Vergangenheit von „worst-case“-Szenarien bei der Prozessauslegung ausgegangen oder im Betrieb die Anlagenkapazität der Eingangsqualität angepasst und/oder Endproduktqualitätsschwankungen sowie erhöhte Rückstandsmengen in Kauf genommen. Andererseits wurden, teils vergeblich, von den Sortiermaschinenherstellern umfangreiche Bemühungen in die Entwicklung komplexer Bildverarbeitungsalgorithmen investiert, die auch die Klassifizierung von verunreinigten Scherben sicherstellen sollten. Ein Waschen der Altglasscherben ist verfahrenstechnisch ungünstig und oftmals aufgrund der Abwasserproblematik nicht möglich (53).

In Bezug auf die Detektion führt die Verunreinigung quasi zu einer oberflächlichen Verfärbung und damit zu einer massiven Beeinflussung oder Störung der Detektion. In Abbildung 65 ist der Einfluss auf die Grauwertverteilung am Beispiel von Weißglasscherben dargestellt. Insbesondere die Standardabweichung, in der Abbildung als StdDev benannt, wird durch Verunreinigungen (b) deutlich größer und dies steht im Widerspruch zu den unter 6.2 angeführten zweiten Aspekt.

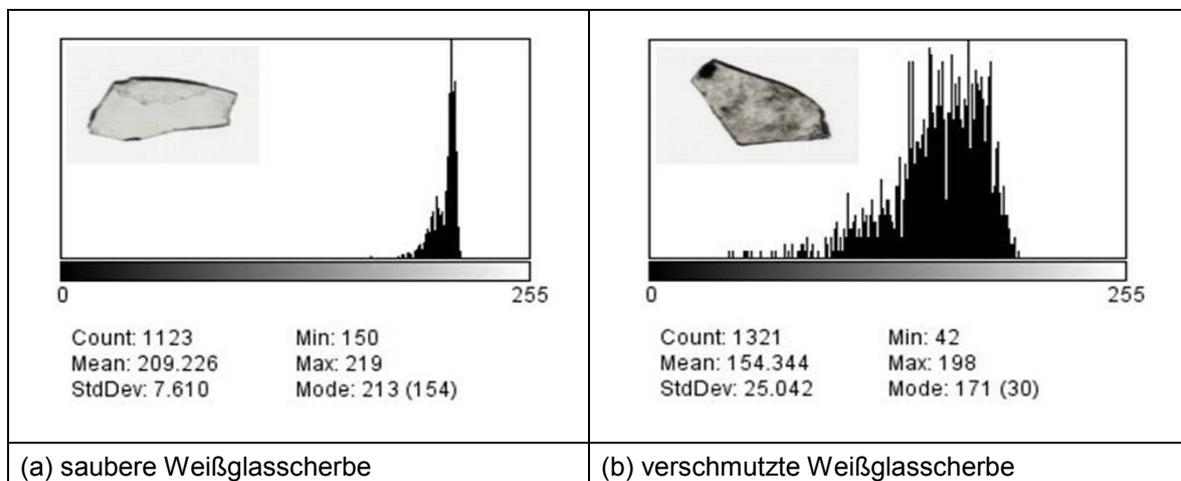


Abbildung 65: Beeinflussung der Intensitätsverteilung durch Verschmutzung⁸

Alternativ dazu wurde ein neuartiges Konditionierungskonzept von Binder+Co AG für eine trockene Scherbenwäsche (TW) entwickelt (80) und in die Vorbehandlung, wie in Abbildung 66 schematisch dargestellt, integriert.

⁸ Ausgewertet mit „ImageJ“, Version 1.48, Freeware

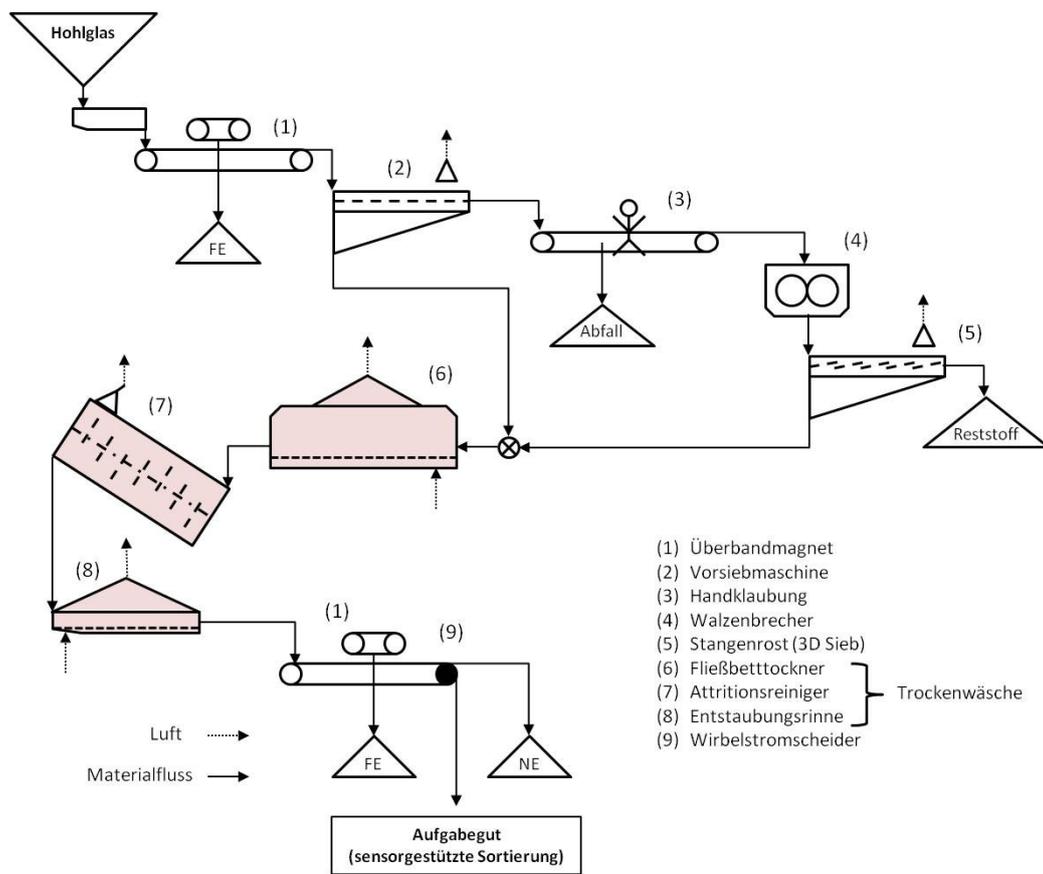


Abbildung 66: Prozessschema einer Voraufbereitung für Hohlglas

Glasbruch mit hohem Feuchtegehalt wird in einem Fließbettrockner (6), der sich durch Energieeffizienz, geringen Verschleiß und geringen Zerkleinerungsgrad auszeichnet, auf < 0,5 % Feuchtegehalt getrocknet. Anschließend wird der Glasbruch in einem speziellen Attritionsreiniger (7), der konstruktiv auf dem Prinzip einer Schwertwäsche basiert, behandelt. Durch schonende Reibbeanspruchung werden Anhaftungen und Verschmutzungen von den Scherbenoberflächen entfernt sowie die Bruchkanten abgerundet. Über eine Schurre oder ein anderes Förderaggregat gelangt das derart vorbehandelte Scherbengut nun zu einer Entstaubungsrinne (8), auf der Feinkorn und Staub durch Sichtung entfernt wird. In Abbildung 67 ist der Effekt dieser Konditionierung auf verschiedene Glasbruchfraktionen bildlich dargestellt (53), (81).

| | | | |
|------------------------------|---|--|---|
| verschmutzt / beschichtet |  |  |  |
| gereinigt |  |  |  |
| | (a) Weißglasscherbe | (b) TV-Glasscherben | (c) Trockenschlacke |

Abbildung 67: Effekt der Trockenwäsche

Dieses Konzept mit gezielter Entstaubung an den Aggregaten reduziert die Staubproblematik anderer Trocknungskonzepte in der Gesamtanlage wesentlich. Die damit einhergehende Erhöhung der Investitionskosten für die Trockenwäsche wird durch eine geringere Anzahl von Sortierern und Kosteneinsparungen bei anderen Aggregaten und Anlagenteilen ausgeglichen. Auch die zusätzlichen Energiekosten für die Trocknung werden durch die stabileren Betriebsbedingungen, höheren Produktionsqualitäten und –mengen und einem deutlich reduzierten Druckluftverbrauch bei der optischen Sortierung mehr als kompensiert. Wie durch die Versuchse mit Altglas dokumentiert wurde, kann bei der Sortierung von verschmutztem Altglas der Druckluftverbrauch über alle Kornbereiche bis nahezu doppelt so hoch sein.

6.4.1.2 Sortiergut- und Zielqualitäten

Die Tabelle 16 zeigt fotografisch die relevanten und typischen Material- bzw. Qualitätsklassen für die Hohlglasaufbereitung. Die Merkmalsklasseneinteilung ist historisch bedingt und steht in Zusammenhang mit den Qualitätsanforderungen bei der Wiederverwertung. Die Objekte sind stofflich überwiegend homogen und gut aufgeschlossen. Sofern die Konditionierung wie in Abbildung 66 aufgebaut ist, ist das Aufgabe- bzw. Zwischengut nahe zu frei von Organik (MK4), Metallen (MK5), oberflächlich gereinigt sowie entstaubt. Die Kornspanne reicht von 0 bis 50 mm.

| | | |
|--|--|--|
|  |  |  |
| Aufgabegut: 0 bis 50mm | MK1 - Weißglas | MK2 - Braunglas |
|  |  |  |
| MK3 – Grünglas | MK4 – Organik/Plastik | MK5 - Metalle |
|  |  |  |
| MK6 - KSP ⁹ | MK7 - Glaskeramik | MK8 – bleihaltige Gläser |

Tabelle 16: Qualitäts- und Merkmalsklassendefinition – Hohlglas

Der Gehalt der einzelnen Merkmalsklassen variiert, wie bereits erwähnt, stark und muss für jede Applikation analysiert werden. Für kommunal gesammelte Fraktionen beträgt der Glasanteil aber deutlich über 95 %. Die Gehalte der einzelnen glasfremden Klassen liegen im Promille- bis einstelligen Prozentbereich und werden daher üblicherweise auch in [g/t] angegeben. Dies zeigt auch die Analyse einer Curbside-Probe aus Großbritannien, welche in Tabelle 17 ausgewiesen ist. Zu berücksichtigen sind auch die kornklassenabhängigen Gehaltsunterschiede der glasfremden Merkmalsklassen, welche sich auf die Prozessgestaltung auswirken. Der Merkmalsklasse Grünglas (MK3) werden neben grünen Glasscherben auch dead-leaf, blau oder rosa gefärbte Glasscherben zugeordnet.

⁹ KSP....Keramik, Stein und Porzellan

| Curbside-Fraktion, GB, Analyse 2011 | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|---------------|--------------|---------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|--------------------------|---------------|-------------|
| Korngröße | | KG-Verteilung | | Organik/ Plastik | Metalle | Bleiglas* | Glas- keramik | KSP | Weißglas | Grünglas | Braunglas |
| [mm] | [mm] | [g] | [%] | [g/t] | [g/t] | [g/t] | [g/t] | [g/t] | [%] | [%] | [%] |
| 31,5 | X | 2800,5 | 23,4 | 15588 | 32187 | 4640 | 0 | 0 | 52,4 | 32,7 | 14,9 |
| 22,4 | 31,5 | 2347,3 | 19,6 | 12797 | 4308 | 5972 | 0 | 9474 | 54,2 | 32,3 | 13,6 |
| 16 | 22,4 | 1958,9 | 16,3 | 8933 | 675 | 3581 | 460 | 4784 | 54,2 | 33,4 | 12,4 |
| 12,5 | 16 | 1593,4 | 13,3 | 6265 | 4322 | 4322 | 380 | 0 | 53,1 | 33,4 | 13,5 |
| 10 | 12,5 | 1023 | 8,5 | 7865 | 587 | 3424 | 0 | 3160 | 47,7 | 39,0 | 13,2 |
| 8 | 10 | 1096,7 | 9,2 | 22634 | 429 | 2253 | 182 | 748 | 52,7 | 34,0 | 13,3 |
| 5 | 8 | 851 | 7,1 | 29950 | 352 | 1527 | 0 | 716 | 51,0 | 34,6 | 14,3 |
| 3,15 | 5 | 314,2 | 2,6 | 90011 | 756 | 1714 | 0 | 3256 | 50,1 | 37,7 | 12,2 |
| 0 | 3,15 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| Total: | | 11985 | 100,0 | 15679 | 9197 | 4065 | 142 | 3113 | 50,9 | 32,7 | 13,2 |
| | | | | | | | | | Glas- gehalt: | 96,78% | |

* mittlerer Pb-Gehalt 10,2%

Tabelle 17: Beispiel einer Korngrößen- und Gehaltsanalyse von Altglas

Aus den Produktqualitätszielen, die individuell zwischen Aufbereiter und Wiederverwerter vereinbart oder durch Sammelsystemorgane übergeordnet geregelt werden, leiten sich die Trennaufgaben ab.

| Verunreinigungen | Behälterglas | | | |
|---|--|-------------|-------------|-------------|
| | Weiß | Grün | Braun | Bunt |
| KSP (g/t) Keramik, Steine, Porzellan | 20 / > 50 | | | |
| NE Metalle (g/t) | 3 / > 5 | | | |
| Fe Metalle (g/t) | 2 / > 5 | | | |
| Glaskeramik > 10 mm (g/t) | 5 / > 5 | | | |
| Glaskeramik ≤ 10 mm (g/t) | 10 / > 30 | | | |
| Lose Organik (g/t) | 300 / > 500 | | | |
| Feuchte (%) | 2 / > 5 | | | |
| Schwermetalle (ppm) Pb, Cd, Cr(VI), Hg | 200 * | | | |
| Korngröße | Weiß | Grün | Braun | Bunt |
| < 6,3 mm Quadratsieb (%) | 18 / > 25 | | | |
| < 1mm Quadratsieb (%) | 5 / > 8 | | | |
| Fehlfarbe | Weiß | Grün | Braun | Bunt |
| Weiß (%) incl. Lichtgrün & Halbweiß | | | | |
| Grün (%) Behälterglas incl. red. Grün λ _{Dom.} 568 - 575 nm | 0,2 / > 0,4 | Min. 75 / - | 10 / > 15 | Min. 80 / - |
| Braun (%) incl. aller Brauntöne | 0,3 / - | 10 / - | Min. 80 / - | |
| Bunt (%) | 0,2 / - | | | |
| Beschreibung: | 1. Wert (fett dargestellt) = Mittelwert aus 250 t oder im Monat 2. Wert (<i>kursiv dargestellt</i>) = Ablehnungsgrenze Alle Werte sind maximale Werte, außer die mit Min. beschriebenen. * Richtwert | | | |

Tabelle 18: BVSE-Störstoffgrenzwerte für Fertigscherben; Quelle: (10)

Für Deutschland kann dazu beispielsweise auf die BVSE-Leitlinie T120 (10) „Qualitätsanforderung an Glasscherben zum Einsatz in der Behälterglasindustrie“ als Standard verwiesen werden. Auszugsweis daraus sind die Grenzwerte für Störstoffe in Fertigscherben in Tabelle 18 dargestellt.

6.4.1.3 KSP-Abtrennung und Herstellung von Farbfraktionen aus Mischglas

Bei der Hohlglasaufbereitung müssen mit dem Sortierprozess zumindest die keramischen und mineralischen Fremdstoffe (MK6) aussortiert werden. Oftmals erforderlich ist auch die Verbesserung der Farbreinheit oder die Erzeugung von Farbfraktionen aus Mischglas. In Abbildung 68 ist dazu ein typisches Prozessbeispiel zur Herstellung von drei Farbglasfraktionen (MK1, MK2, MK3) dargestellt. Das Verfahren beinhaltet alle klassischen Trennfunktionen wie Grundstufe bzw. „Rougher“, Reinigerstufe bzw. „Cleaner“ und Rückgewinnungsstufen bzw. „Scavenger“ sowie eine Trennstufe (12.2) mit hybridischer Trennfunktion. Dieses Prozessbeispiel soll als Fallbeispiel nachfolgend näher erörtert werden.

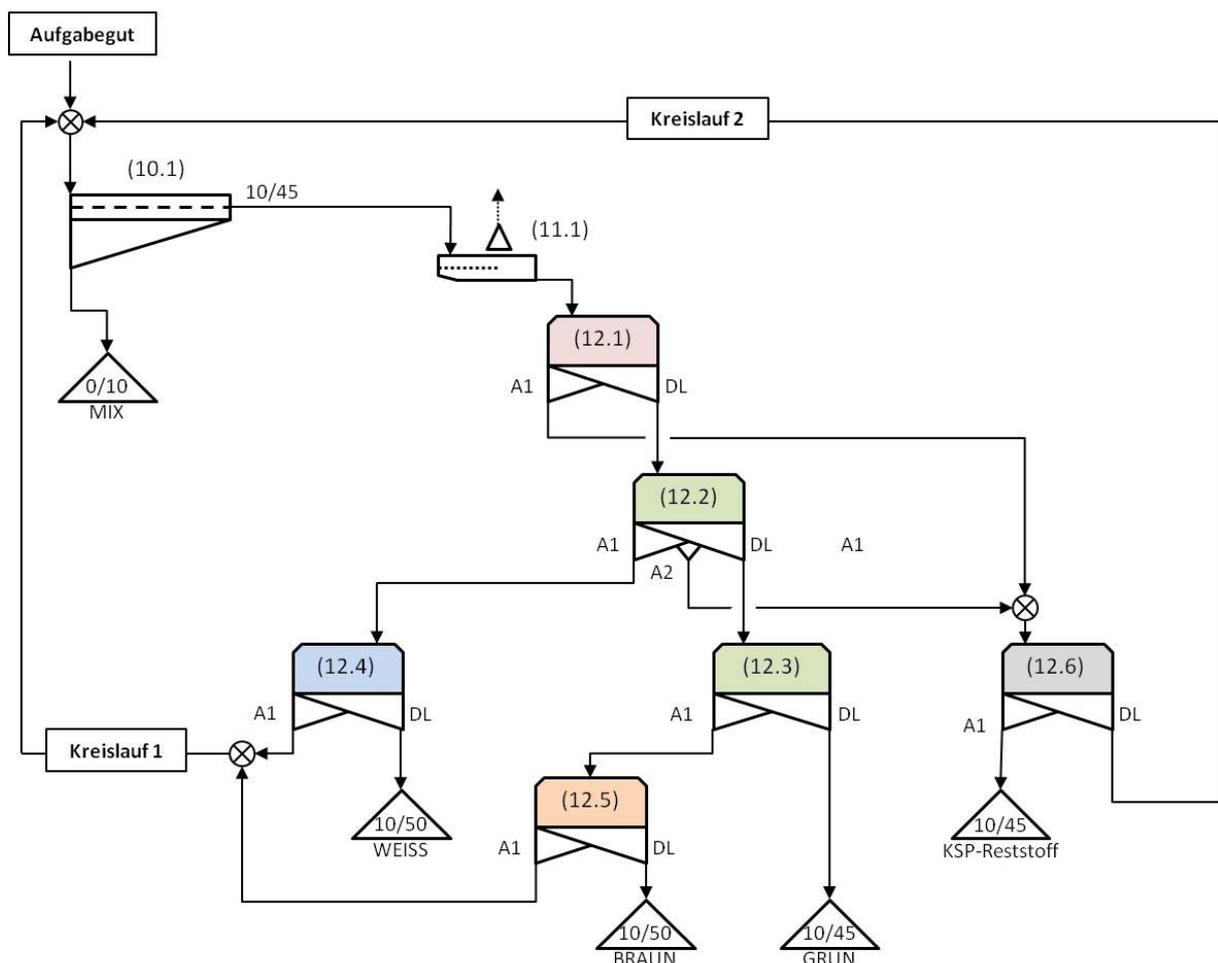


Abbildung 68: Pressschema Farbtrennung und -verbesserung

Der VIS-basierten Sortierung ist eine Klassierstufe (10.1) vorgeschaltet. Falls erforderlich, wird mittels integrierter spezifischer Absaugtechnik (11.1) der Organikgehalt (MK4) reduziert und entstaubt. Nach einer ersten KSP-Reinigungs- bzw. Grundstufe (12.1) ist eine zweite kombinierte Trennstufe (12.2) mit zwei Auswurfwegen (A1, A2) geschaltet, um zusätzlich zur einer weiteren KSP-Abscheidung (A1) auch eine Weißglaszwischenfraktion (A2) zu gewinnen. Diese wird in diesem Fall in einer Stufe (12.4) nachgereinigt. Das Durchlaufprodukt der zweiten Trennstufe wird auf einer weiteren Sortiermaschine (12.3) in eine Braun- und Grünglasfraktion getrennt. Die Braunglasfraktion wird auf einer weiteren Sortierstufe (12.5) nachgereinigt. Aus den zusammengeführten Störstofffraktionen wird auf einer Rückgewinnungsstufe (12.6) Glas rückgewonnen und dem Aufgabegut kontinuierlich (Kreislauf 1) zugegeben. Über einen eigenen Kreislauf (Kreislauf 2) werden die Auswurfaktionen der Farbnachreinigungsstufen ebenfalls kontinuierlich direkt dem Aufgabegut zugegeben. Zudem sind die optischen Sortierer mit Induktionsleisten bestückt, mit denen metallische Störstoffe (MK5) in die KSP-Reststofffraktion aussortiert werden, welche der Wirbelstromabscheider nicht abtrennen konnte. Nicht in der Voraufbereitung ausgeschiedene organische Störstoffe (MK4) verteilen sich entsprechend der optischen Eigenschaft auf die Fraktionen. Vorzugsweise konzentrieren sie sich im KSP-Reststoff. Die Sonderglasklassen MK7 und MK8 werden in diesem Verfahrensbeispiel nicht explizit berücksichtigt und verteilen sich ebenfalls entsprechend der optischen Eigenschaft auf die Trennprodukte.

6.4.1.3.1 Spezifische optische Eigenschaften

Wie in der Altglasaufbereitung üblich, erfolgt die optische Sortierung auf Basis der Transmissionseigenschaften. Die wesentliche Störstoffklasse MK5 ist durch sehr geringe Transmissionsintensität $I_{\max(\text{RGB})} < 5\%$ definiert. Glasobjekte sind durch Transmissionswerte $I_{\max(\text{RGB})} > 5\%$ und deren Farbe gekennzeichnet. Besonderes Augenmerk wurde bei dieser Applikation auf die Bereichsgrenzen zwischen Braun (MK2) zu KSP (MK6) gelegt und dafür eine spezielle Klasse „dunkel Braun“ (MK2.1) zur Optimierung der Konfiguration definiert. Die Abbildung 69 illustriert dazu für eine Auswahl an Braunglasscherben und KSP-Objekten (a) die Problematik der Abgrenzung anhand von Klassifikationsergebnissen (b) und einer RGB-Zeilenprofilardarstellung (c). Glasscherben mit sehr geringer Transmission ($S5_{\text{MK2.1}}$, $I/I_0 < 5\%$) sind im Gegenlichtverfahren von dünnen Porzellanstücken ($S6_{\text{MK6}}$) nicht zu unterscheiden.

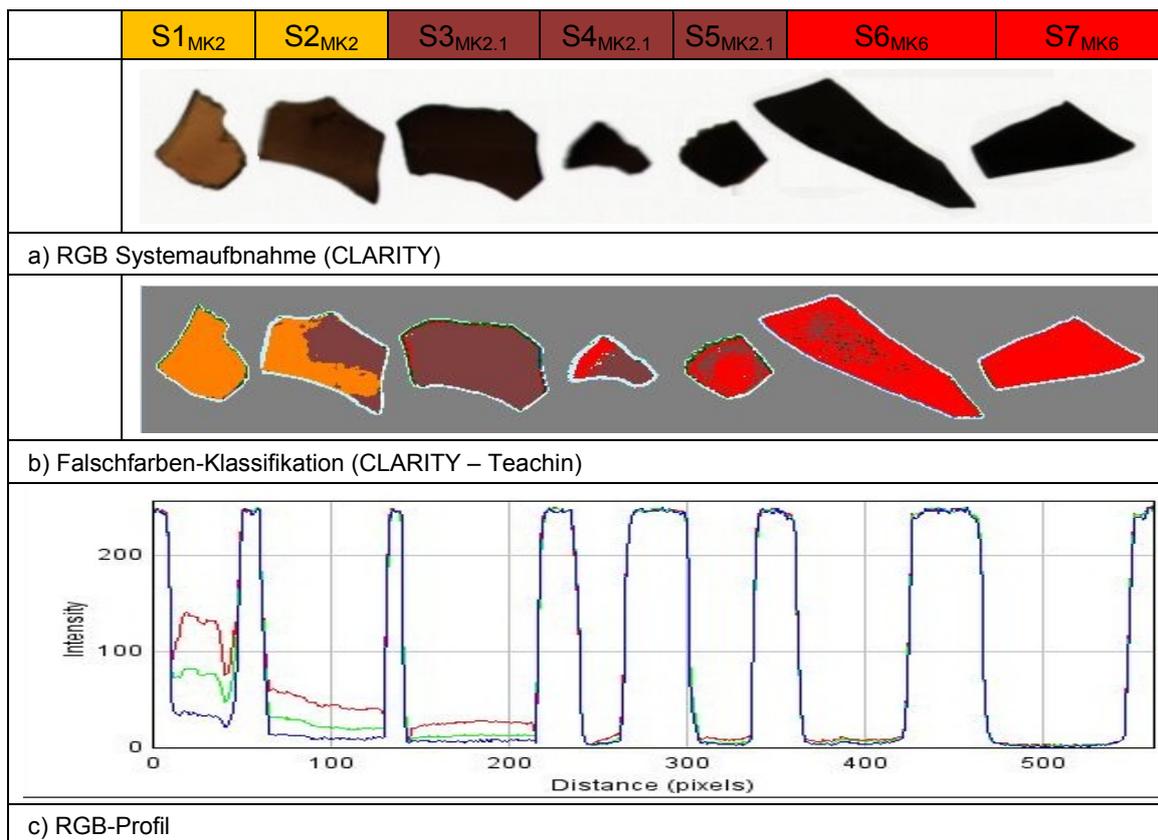


Abbildung 69: Klassifikationsvergleich - Braun, dunkel Braun und KSP

6.4.1.3.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsserie wurde auf einem CLARITY VIS/Metall-Testsystem mit Serienausrüstung im Technikum der Fa. Binder+Co AG ohne Kreislaufführung (open loop) durchgeführt. Das Probenmaterial Hohlglas-14/2011¹⁰ wurde bereits vorkonditioniert beige stellt. Die Farbklassengrenzen wurden anhand von Musterscherben definiert und darauf basierend eine geeignete Farbklassifikationstabelle in Abstimmung mit dem Interessenten erstellt. Das Testsystem wurde entsprechend der jeweiligen Sortieraufgabe parametrier¹¹. Die Analyse der Versuchschargen erfolgte mittels visueller Bewertung bzw. Handklaubung.

Angemerkt sei an dieser Stelle, dass die referenz-basierte, subjektive, visuelle Analyse der Trennergebnisse, insbesondere im Sekundärrohstoffbereich, zur Effizienz- und Qualitätsbewertung sehr verbreitet ist. Für künstlich hergestellte Materialien bzw. Werkstoffe ist diese Methode meist exakt genug, um reproduzierbar Objekte zu klassifizieren und davon die Fraktionsqualität abzuleiten. Bei der Stückguttrennung

¹⁰ Interne Probenbenennung von Binder+Co AG

¹¹ MMI-SW: V 1.9.1.2, Sortierrechner-SW: V 1.4.8

mineralischer Rohgutarten wie Industriemineralen, Erze und Salze ist diese Bewertungsmethode oftmals für eine exakte reproduzierbare Klassifizierung zu ungenau. Unter Berücksichtigung der Verwachsungsverhältnisse und der Merkmals- bzw. Qualitätseigenschaft ist die einfache visuelle Bewertung bzw. Handklaubung jedoch geeignet für eine rasche grobe Effizienz- und Trendanalyse. Für eine verlässliche und reproduzierbare Effizienz- und Qualitätsbewertung sind aber zumeist chemische und physikalische Analysemethoden erforderlich.

6.4.1.3.3 Ergebnisse

Aus den Versuchsergebnissen zu Pos.12.1 (Tabelle 19) ergibt sich für KSP ein Inhaltsausbringen ($r_{\text{KSP,A1}}$) bzw. AG_{KSP} von 99,7 %. Betrachtet man nur die drei Merkmalsklassen Weiß, Grün und Braun und fasst diese zu einer Wertstoffgruppe zusammen, so ergibt sich aus den Versuchswerten eine geringe Übersortierung $\ddot{U}_{\text{Weiß,Grün,Braun}}$ von 3,85 %¹² für diese Wertstoffgruppe. Es ergibt sich nach (5.10) ein sehr guter Trenngrad von ca. 96 % bezogen auf die Störstoffklassen KSP und die Wertstoffgruppe. Die Übersortierung verteilt sich zudem in gleicher Weise auf die drei Hauptglasklassen, was auf einen überwiegend effektorischen Beifang als Ursache schließen lässt. Lediglich für die spezielle Glasfarbkategorie „dunkel Braun“ ist die \ddot{U} bzw. das Inhaltsausbringen ($r_{\text{dunkel Braun,A1}}$) mit 77,3 % deutlich ungünstiger. Dies ist im Wesentlichen auf die kritische Lage des Farbklassenbereiches, welcher direkt an den des KSP-Bereiches angrenzt bzw. sich mit diesem teilweise sogar überschneidet, zurückzuführen. In diesem Falle ist die in Kapitel 6.2 beschriebene zweite Voraussetzung für optische Sortierung nur bedingt erfüllt und wirkt sich direkt auf die Leistungsfähigkeit aus. Betrachtet man alle Glasfarbklassen (Weiß, Grün, Braun und dunkel Braun) zusammen, so ergibt sich eine \ddot{U}_{Glas} von 6,3 % und der Trenngrad sinkt auf 93,4 %.

Die Ergebnisse zu Pos. 12.2, welche in Tabelle 20 dargestellt sind, zeigen, dass eine Weißglaszwischenfraktion mit guter Reinheit ($g_{\text{Weiß,A1}}$) von 92,7 % bei einem Inhaltsausbringen ($r_{\text{Weiß,A1}}$) von 96,8 % gewonnen werden konnte. Der AG_{KSP} von 83,3 % ist im Vergleich zu Versuch Pos. 12.1 geringer. Dies ist auf die etwas ungünstigeren geometrischen Verhältnisse für den zweiten Auswurfweg zurückzuführen. Der KSP-Gehalt beider Produktfraktionen ($g_{\text{KSP,A1}}$, $g_{\text{KSP,D1}}$) entspricht bereits den BVSE-Qualitätsstandards aus Tabelle 18.

¹² errechnet aus Tabellenwerten

| Aufgabe: konditioniertes Misch-Glas, 10/45mm | | | |
|--|--------|----------------------|------------------------|
| | M [g] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| Weiß | 17 270 | 34,2 | |
| Grün | 14 886 | 29,5 | |
| Braun | 14 611 | 28,9 | |
| KSP | 1 737 | 3,4 | 34 414 |
| Metalle | 173 | 0,3 | 3 428 |
| dunkel Braun | 1 588 | 3,1 | 31 462 |
| Organik | 208 | 0,4 | 4 121 |
| Summe | 50473 | 100,0 | |

| | | | |
|--------------------------|-----------------------|------|--------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | 50 | [sec] |
| 12.1 - A1: KSP + Metalle | Kapazität auf 480mm: | 3,63 | [t/h]. |
| 12.1 - A2: --- | Kapazität auf 1000mm: | 7,57 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Auswurf 2 (A2) | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------------|--------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [g] | g _{i,A2} [%] | g _{i,A2} [g/t] | r _{i,A2} [%] | M [g] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| Wei | 626,0 | 12,4 | | 3,6 | | | | | 16644,0 | 36,7 | | 96,4 |
| Grün | 586,0 | 11,6 | | 3,9 | | | | | 14300,0 | 31,5 | | 96,1 |
| Braun | 589,0 | 11,6 | | 4,0 | | | | | 14022,0 | 30,9 | | 96,0 |
| KSP | 1731,0 | 34,2 | 341622 | 99,7 | | | | | 6,0 | 0,0 | 132,1 | 0,3 |
| Metalle | 173,0 | 3,4 | 34142 | 100,0 | | | | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| dunkel Braun | 1227,0 | 24,2 | 242155 | 77,3 | | | | | 361,0 | 0,8 | 7 950 | 22,7 |
| Organik | 135,0 | 2,7 | 26 643 | 64,9 | | | | | 73,0 | 0,2 | 1 607 | 35,1 |
| Summe | 5067,0 | 100,0 | | | | | | | 45406,0 | 100,0 | | |
| r _{m,j} [%] | 10,0 | | | | | | | | 90,0 | | | |

Tabelle 19: Ergebnisse des Versuches zu Pos. 12.1

| Aufgabe: 12.1 - DL 10/45mm |
|-------------------------------|
|-------------------------------|

| | | | |
|------------------|-----------------------|------|-------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | 60 | [sec] |
| 12.2 - A1: Weiß | Kapazität auf 480mm: | 2,72 | [t/h] |
| 12.2 - A2: KSP | Kapazität auf 1000mm: | 5,68 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Auswurf 2 (A2) | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------------|---------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [g] | g _{i,A2} [%] | g _{i,A2} [g/t] | r _{i,A2} [%] | M [g] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| Wei | 16105,0 | 92,7 | | 96,8 | 127,0 | 18 | | 0,8 | 412,0 | 1,5 | | 2,5 |
| Grün | 500,0 | 2,9 | | 3,5 | 166,0 | 23 | | 1,2 | 13634,0 | 49,9 | | 95,3 |
| Braun | 750,0 | 4,3 | | 5,3 | 270,0 | 38 | | 1,9 | 13002,0 | 47,6 | | 92,7 |
| KSP | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,0 | 1 | 7 062 | 83,3 | 1,0 | 0,0 | 36 | 16,7 |
| Metalle | 0,0 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | 0,0 | 0,0 |
| dunkel Braun | 9,0 | 0,1 | 518 | 2,5 | 67,0 | 9 | 94 632 | 18,6 | 285,0 | 1,0 | 10 426 | 78,9 |
| Organik | 0,0 | | 0,0 | 0,0 | 73,0 | 10 | 103 107 | 100,0 | 0,0 | | 0,0 | 0,0 |
| Summe | 17364,0 | 100 | | | 708,0 | | | | 27334,0 | 100 | | |
| r _{m,j} [%] | 38,2 | | | | 1,6 | | | | 60,2 | | | |

Tabelle 20: Ergebnis des Versuches zu Pos.12.2

In Tabelle 21 sind die Ergebnisse zu Pos. 12.3 dargestellt. Mit Reinheiten von 91,7 % und 95,0 % konnte eine sehr gute Farbklassentrennung von Braun- und Grün­glas erzielt werden. Die fraktionsbezogenen Trenngrade liegen bei über 90 %. Funktionsbedingt erfolgt eine Konzentration der KSP-Objekte in der Grün­glasfraktion, wodurch der KSP-Gehalt ($g_{KSP,DL}$) über die zulässige Qualitätsgrenzen auf 74,3 g/t ansteigt. Alternativ zu einer weiteren Nachreinigungsstufe für die Grün­glasfraktion könnten die KSP-Objekte in der Braunglasfraktion angereichert und auf der Pos 12.5 der Kreislauffraktion 2 zugeschlagen werden.

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|--|-------------------------|--|-----------------------|--|------|-------|
| Aufgabe: 12.2 - DL 10/45mm | | | | | Prozessfunktion: | | Zeit: | | 70 | [sec] |
| | | | | | 12.3 - A1: Braun | | Kapazität auf 480mm:: | | 1,41 | [t/h] |
| | | | | | 12.3 - A2: --- | | Kapazität auf 1000mm: | | 2,93 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Auswurf 2 (A2) | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------|---------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,A2}$ [%] | $g_{i,A2}$ [g/t] | $r_{i,A2}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| Weiß | 36,0 | 0,3 | | 8,7 | | | | | 376,0 | 2,8 | | 91,3 |
| Grün | 846,0 | 6,1 | | 6,2 | | | | | 12788,0 | 95,0 | | 93,8 |
| Braun | 12714,0 | 91,7 | | 97,8 | | | | | 288,0 | 2,1 | | 2,2 |
| KSP | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | | 1,0 | 0,0 | 74,3 | 100,0 |
| Metalle | 0,0 | | 0,0 | 0,0 | | | | | 0,0 | | 0,0 | 0,0 |
| dunkel Braun | 270,0 | 1,9 | 19 472 | 94,7 | | | | | 15,0 | 0,1 | 1 113 | 5,3 |
| Organik | 0,0 | | 0,0 | 0,0 | | | | | 0,0 | | 0,0 | 0,0 |
| Summe | 13866,0 | 100 | | | | | | | 13468,0 | 100 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 50,7 | | | | | | | | 49,3 | | | |

Tabelle 21: Ergebnisse des Versuches zu Pos. 12.3

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|--|-------------------------------------|--|-----------------------|--|------|-------|
| Aufgabe: 12.2 - A1 10/45mm | | | | | Prozessfunktion: | | Zeit: | | 23 | [sec] |
| | | | | | 12.4 - A1: Braun+ Grün + KSP | | Kapazität auf 480mm: | | 2,72 | [t/h] |
| | | | | | 12.4 - Eject2 : --- | | Kapazität auf 1000mm: | | 5,66 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Auswurf 2 (A2) | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------|--------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,A2}$ [%] | $g_{i,A2}$ [g/t] | $r_{i,A2}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| Weiß | 525,0 | 30,4 | | 3,3 | | | | | 15580,0 | 99,6 | | 96,7 |
| Grün | 484,0 | 28,0 | | 96,8 | | | | | 16,0 | 0,1 | | 3,2 |
| Braun | 712,0 | 41,2 | | 94,9 | | | | | 38,0 | 0,2 | | 5,1 |
| KSP | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | | | | | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| Metalle | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | | | | | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| dunkel Braun | 8,0 | 0,5 | 4 627 | 88,9 | | | | | 1,0 | 0 | 64 | 11,1 |
| Organik | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | | | | | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| Summe | 1729,0 | 100 | | | | | | | 15635,0 | 100 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 10,0 | | | | | | | | 90,0 | | | |

Tabelle 22: Ergebnisse des Versuches zu Pos. 12.4

In Tabelle 22 sind die Ergebnisse der Nachreinigungsstufe Pos. 12.4 für die Weißglaszwischenfraktion dargestellt. Mit einer Reinheit ($g_{\text{Weiß,DL}}$) von 99,6 % liegt die erzeugte Weißglasendfraktion klar über der Qualitätsgrenze aus Tabelle 18. Zudem ist auch das Inhaltsausbringen ($r_{\text{Weiß,DL}}$) mit 96,7 % sehr hoch.

Die Ergebnisse der Nachreinigungsstufe Pos. 12.5 für die Braunglaszwischenfraktion sind in Tabelle 23 dargestellt. Mit einer Reinheit ($g_{\text{Braun,PA}}$) von 97,6 % liegt die erzeugte Braunglasendfraktion deutlich über der Qualitätsgrenze aus Tabelle 18. Zudem ist auch das Inhaltsausbringen ($r_{\text{Braun,PA}}$) mit 98 % sehr hoch. Eine Nachreinigungsstufe für Braunglas könnte, sofern nicht höhere Qualitätsziele gefordert sind, entfallen.

**Aufgabe: 12.3 – A1
10/45mm**

| | | | |
|---------------------------------|-----------------------|------|-------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | 20 | [sec] |
| 12.5 - A1: Weiß+Grün+KSP | Kapazität auf 480mm: | 2,50 | [t/h] |
| 12.5 - Eject2 : --- | Kapazität auf 1000mm: | 5,20 | [t/h] |

| | Auswurf 1 (A1) | | | | Auswurf 2 (A2) | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|---------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,A2}$ [%] | $g_{i,A2}$ [g/t] | $r_{i,A2}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| Weiß | 31,0 | 2,8 | | 86,1 | | | | | 5,0 | 0,0 | | 13,9 |
| Grün | 799,0 | 72,8 | | 94,4 | | | | | 47,0 | 0,4 | | 5,6 |
| Braun | 254,0 | 23,1 | | 2,0 | | | | | 12460,0 | 97,6 | | 98,0 |
| KSP | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | | | | | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| Metalle | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | | | | | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| dunkel Braun | 14,0 | 1,3 | 12 750 | 5,2 | | | | | 256,0 | 2 | 20 050 | 94,8 |
| Organik | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | | | | | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| Summe | 1098,0 | 100 | | | | | | | 12768,0 | 100,0 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 7,9 | | | | | | | | | 92,1 | | |

Tabelle 23: Ergebnisse des Versuches zu Pos. 12.5

In Tabelle 24 sind die Ergebnisse für die Rückgewinnungsstufe Pos. 12.6 dargestellt. Der AG_{KSP} ($r_{\text{KSP,A1}}$) ist mit 99,1 % wieder hoch. Neben den KSP-Objekten wurden wenige und nicht transparente Glas-Objekte durch die vorgelagerten Sortierstufen in der Aufgabe konzentriert, was zu einer deutlich höheren Übersortierung der Wertstoffgruppe $\dot{U}_{\text{Weiß,Grün,Braun}}$ von 12,5 %¹³, im Vergleich zu den Ergebnissen zu Pos. 12.1 (Tabelle 19), führte. Trotz geringerem Trennungsgrad von 86,6 % konzentrierten sich die KSP-Objekte, wie gewünscht, in der Reststofffraktion mit einem hohen Gehalt ($g_{\text{KSP,E1}}$) von 71,7 %. Durch Änderung der Parametrierung bzw. Gewichtung konnte die Übersortierung ($r_{\text{dunkel Braun,A1}}$) mit 25,9 % der Klasse „dunkel Braun“ deutlich reduziert werden. Diese Klasse ist aber mit einem Gehalt

¹³ errechnet aus Tabelle

($g_{\text{dunkel Braun,A1}}$) von 13,8 % entscheidend für den Glas-Gehalt in der Reststofffraktion und dem sogenannten „Glasverlust“. Der KSP-Gehalt ($g_{\text{KSP,DL}}$) der Durchlaufraktion liegt mit 0,5 % bzw. 5.183 g/t deutlich unter dem der Aufgabe von 3,4 % bzw. 34.414 g/t gemäß Tabelle 19. Diese Fraktion kann, wie in der Praxis üblich und in Abbildung 68 dargestellt, der Aufgabe wieder beigegeben werden.

| Aufgabe: 12.1- A1 + 12.2- A2 10/45mm | | | |
|---|---------|---------------|-----------------|
| | M [g] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| Weiß | 728,0 | 13,0 | |
| Grün | 738,0 | 13,2 | |
| Braun | 811,0 | 14,5 | |
| KSP | 1 803,0 | 32,3 | 323 176 |
| Metalle | 174,0 | 3,1 | 31 188 |
| dunkel Braun | 1 325,0 | 23,7 | 237 498 |
| Organik | | | |
| Summe | 5579,0 | 100,0 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | --- | [sec] |
|---------------------|-----------------------|-----|--------|
| 12.6 – A1: KSP | Kapazität auf 480mm: | --- | [t/h] |
| 12.6 - Eject2 : --- | Kapazität auf 1000mm: | --- | [t/h]. |

| | Auswurf 1 (A1) | | | | Auswurf 2 (A2) | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|---------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,A2}$ [%] | $g_{i,A2}$ [g/t] | $r_{i,A2}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| Weiß | 63,0 | 2,5 | | 8,7 | | | | | 665,0 | 21,5 | | 91,3 |
| Grün | 90,0 | 3,6 | | 12,2 | | | | | 648,0 | 21,0 | | 87,8 |
| Braun | 132,0 | 5,3 | | 16,3 | | | | | 679,0 | 22,0 | | 83,7 |
| KSP | 1787,0 | 71,7 | 717 094 | 99,1 | | | | | 16,0 | 0,5 | 5 183,0 | 0,9 |
| Metalle | 77,0 | 3,1 | 30 898 | 44,3 | | | | | 97,0 | 3,1 | 31 422 | 55,7 |
| dunkel Braun | 343,0 | 13,8 | | 25,9 | | | | | 982,0 | 31,8 | 318 108 | 74,1 |
| Organik | | | | | | | | | | | | |
| Summe | 2492,0 | 100 | | | | | | | 3087,0 | 100,0 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 44,7 | | | | | | | | 55,3 | | | |

Tabelle 24: Ergebnisse des Versuches zu Pos. 12.6^{14,15}

6.4.1.4 Sonderglassortierung

Sammelglas ist durch hoch-bleioxidhaltige Glaswerkstoffe, sogenanntes Blei-Silikatglas bzw. Bleiglas (Tabelle 16 / MK8), und/oder zunehmend durch Glaswerkstoffe mit hoher Temperaturbeständigkeit, sogenannter Glaskeramik (Tabelle 16 / MK7), kontaminiert.

Durch den Einsatz von Bleioxid, weisen **Bleigläser** Eigenschaften wie niedrige Schmelztemperaturen, hohe Dichte und hohe Lichtbrechung auf. Im Wesentlichen wird

¹⁴ „Organik“ wurde nicht ausgewertet

¹⁵ Metallerkennung war nicht aktiviert und die diesbezüglichen Werte sind nicht repräsentativ

Bleiglas als Bleikristallglas zur Herstellung von hochwertigem Tafelgeschirr und aufgrund der guten Absorption von Röntgenstrahlen zur Herstellung von Bildröhren eingesetzt (82), (33). Auf die glastechnischen Grundlagen wurden bereits unter 4.4.1.1 eingegangen und werden daher an dieser Stelle nicht weiter erörtert.

Wie auch eigene Analysen von Musterstücken aus verschiedenen Sammelglasfraktionen bestätigen, ist der PbO-Gehalt sehr einflussabhängig und reicht von ca. 0,1 bis ca. 30 % (78). Bei den sehr häufig vorkommenden Bildröhrenkonus- und Bleikristallglasscherben liegt der PbO-Gehalt deutlich über 20 %. Der Gehalt an Bleiglasscherben in Sammelfractionen liegt etwa bei 1.000 bis 10.000 g/t. Bei farbgetrennter Sammlung ist der Gehalt im Sammelgut mit hohem Weißglasanteil typischerweise am höchsten. Aus den in Tabelle 17 abgebildeten Analyseergebnissen ergibt sich beispielsweise für eine Curbside-Fraktion ein Bleiglasscherbengehalt (MK8) von 4.065 g/t mit einer sehr homogenen Verteilung über die Kornklassen. Der analysierte mittlere Pb-Gehalt¹⁶ der Bleigläser beträgt 10,2 %. Daraus ergibt sich ein rechnerischer mittlerer Pb-Gehalt für die gesamte Sammelfraktion von 415 g/t bzw. ppm.

Bleiglasscherben schmelzen in der Schmelzwanne vollständig auf. Es kommt im weiteren Transportprozess zu einer Durchmischung mit dem, in der Behälter- und Flachglasindustrie hauptsächlich eingesetzten, Kalknatron-Silikatglas und homogenen Kontamination in Abhängigkeit der Scherbeneinsatzrate so wie dem Pb-Gehalt der Scherbenfraktion.

In der europäischen Richtlinie 94/62/EG für Verpackungen und Verpackungsabfälle (83) werden die Konzentrationen an Schwermetallen, welche in Verpackungen vorkommen dürfen, geregelt. In der darauf basierenden aktuellen österreichischen Verpackungsverordnung (84) ist eine kumulative Konzentration an Blei, Kadmium, Quecksilber und Chrom VI von bis zu 100 ppm, sofern es sich nicht um Verpackungen aus Bleikristall handelt, festgelegt. Durch eine Ausnahmeregelung der EU-Kommission (85) aus dem Jahr 2001 ist für Glasverpackungen ein Grenzwert von 250 ppm aus ökologischen Gründen zulässig.

Glaskeramik ist, wie in 4.4.1.1 bereits erörtert wurde, bezüglich seiner chemischen Zusammensetzung ähnlich wie Alumosilikatglas. Zusätzliche Oxide wie Zirconium- (ZrO_2) und/oder Titanoxid (TiO_2) wirken als Keime für eine kontrollierte Kristallisation, die in einem zusätzlichen Temperungsprozess erfolgt. Dieser Glaswerkstoff wird beispielsweise zur

¹⁶ Pb-Gehalt $\approx 0.93 \cdot PbO$ -Gehalt

Herstellung von Kochgeschirr, Kochfeldplatten oder Ofenfenstern eingesetzt und hat eine deutlich höhere Erweichungstemperatur ($> 1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$) als Kalknatron-Silikatglas ($\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$). Glaskeramikscherben (MK7) werden in der Schmelzwanne wie KSP-Scherben (MK5) auf Grund ihrer teilkristallinen Struktur nicht vollständig aufgeschmolzen und dies kann in den nachfolgenden Formgebungsprozessen zu Anlagenstörungen oder schlechter Produktqualität führen. In Abbildung 70 ist dazu ein Flasche mit einem glaskeramischen opaken Einschluss abgebildet.



Abbildung 70: Glaskeramischer Einschluss in Behälterglasprodukt

Der Gehalt an Glaskeramikscherben in Sammelfractionen liegt zumeist deutlich unter dem von Bleiglas oder KSP und schwankt zeitlich sowie geografisch sehr stark. Dies wird im Wesentlichen auf Unterschiede im Konsumverhalten und bei den Sammelsystemen zurückgeführt. Systematische, europaweite Analysen zeigen, dass der Gehalt an Glaskeramikscherben zwischen 0 und 500 g/t liegt. Aus den in Tabelle 17 abgebildeten Analyseergebnissen ergibt sich beispielsweise für diese Curbside-Fraktion ein Glaskeramikscherbengehalt von 142 g/t.

Der Scherbenanteil in der Glasproduktion wurde insbesondere in den letzten zehn Jahren aus ökologischen und ökonomischen Gründen sukzessive auf bis zu 90 % gesteigert. Entsprechend sind auch die Qualitätsanforderungen an die Schmelzscherben gestiegen, um einerseits die gesetzlichen Vorgaben bezüglich Schwermetallgehalt in Glasverpackungen und andererseits eine hohe Produktivität sicherzustellen. Dazu wurden auch Störstoffgrenzwerte in Qualitätsanforderungen für Fertigscherben, wie beispielsweise auch in Tabelle 18, aufgenommen und erfordert die Aussortierung von bleihaltigen und hitzebeständigen Glaswerkstoffen bzw. Sondergläsern.

6.4.1.4.1 Spezifische optische Eigenschaften

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde für die Analyse der optischen Eigenschaften von Sondergläsern eine umfangreiche Glasscherbensammlung, die im Anhang F abgebildet ist, zusammengestellt. Am Beispiel einiger Proben daraus werden im Folgenden die farblichen Eigenschaften diskutiert.

Typische Produkte aus Bleiglas sind überwiegend sehr transparent und unbunt, womit sie sich bezüglich Transmissionsfarbe mit Weißglas (MK1) deckt. In Abbildung 71 sind dazu Bleiglasproben und Kalk-Natron-Glasproben dargestellt. Vergleichsweise selten ist Bleiglas intensiv gefärbt. Es ist in diesem Fall die Korrelationsbedingung nach Kapitel 6.2 nicht erfüllt und eine VIS-basierte Klassifikation und Sortierung nicht zielführend.

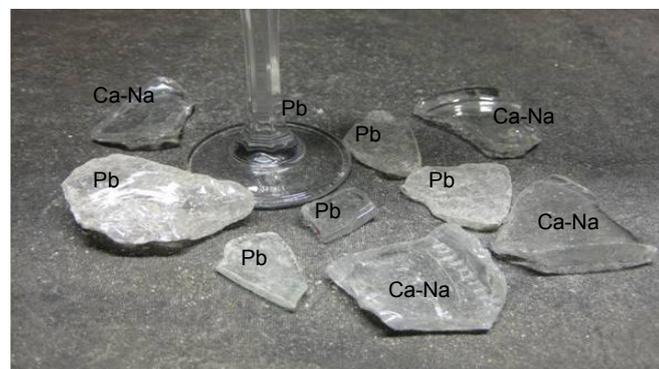


Abbildung 71: Bleiglasproben (Pb) und Kalk-Natron-Glasproben (Ca-Na)

Bei typischen Produkten aus Glaskeramik mit herstellerspezifischen Bezeichnungen wie Jenaer Glas®, Duran®, Ceran® oder Pyrex® variieren die farblichen Ausprägungen je nach Einsatzzweck deutlich stärker.



Abbildung 72: Typische farbliche Ausprägungen von Glaskeramik am Beispiel von Scherbenproben

Die farblichen Ausprägungen reichen, wie auch in Abbildung 72 dargestellt, von sehr transparent und unbunt (Ofenfenster) über hellbraun bis zu wenig transparent und braun (Kochgeschirr) oder violett (Kochfeldplatten).

Bezüglich Transmissionsfarbe decken sich Glaskeramikscherben (MK7) im Wesentlichen mit den Farbglasklassen MK1 und MK2. Spezielle und für glaskeramische Produkte typische Farben wie Rosa, Opak und dunkel Violett (Ceran®) fallen nach gängiger Praxis in die Grünglasklasse (MK3). Die Abbildung 73 illustriert dazu für eine Auswahl an Kalknatron-Silikatglasscherben und Glaskeramikscherben (a) die Problematik der Abgrenzung anhand von Klassifikationsergebnissen (b). Auch mit sehr feiner Farbklassenunterteilung ist eine VIS-basierte Merkmalsklassenzuordnung nicht möglich. In diesem Fall ist ebenfalls die Korrelationsbedingung nach Kapitel 6.2 nicht erfüllt. Die Transmissionsfarbe ist als indirekte Merkmalsklasseneigenschaft, wie auch bei Bleiglas, für eine Klassifizierung und Sortierung nicht geeignet.

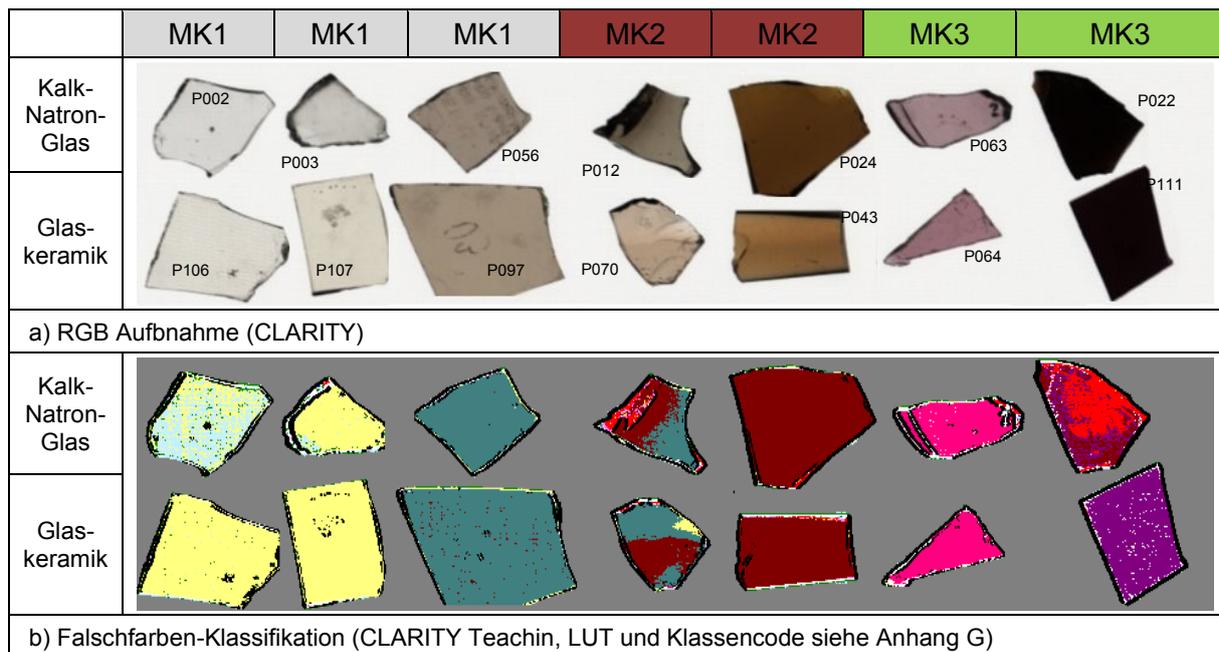


Abbildung 73: Klassifikationsvergleich – Kalk-Natron-Glas vs. Glaskeramik

Bei der Unterscheidung hitzebeständiger (MK7) oder bleihaltiger Glaswerkstoffe (MK8) von normalem Behälterglas (MK1, MK2, MK3) stoßen herkömmliche optische bzw. VIS-basierter Erkennungsmethoden ebenfalls an ihre Grenzen, da sich diese Materialien farblich kaum bzw. nicht voneinander unterscheiden.

6.4.1.4.2 Versuchsdurchführung

In der Vergangenheit wurde mangels alternativer Technik dennoch vereinzelt versucht mit VIS-basierten Sortierern zumindest spezielle und für glaskeramische Produkte typische Farben wie Rosa, Opak und dunkel Violett (Ceran®) für eine Abtrennung zu nutzen.

6.4.1.4.3 Ergebnisse

Versuche ergaben insgesamt einen sehr geringen Trennungsgrad und Produktionsfehler sowie Produktionsstörungen konnten nicht signifikant reduziert werden.

6.4.2 Quarzkies

Quarzkies und -schotter werden traditionell in großen Mengen in der Bauindustrie eingesetzt. Zumeist wird das Rohgut dazu in einem kombinierten Nassprozess gereinigt und klassiert. Die Qualität wird üblicherweise von geometrischen und/oder physikalischen Eigenschaften wie Kornform, Korngrößenverteilung und Frostbeständigkeit abgeleitet. Vermehrt werden Kies- und Schotterprodukte auch für dekorative Zwecke im Außen- und Gartenbereich eingesetzt, wodurch die VIS-basierte Sortierung zur Erzeugung von Farbfraktionen vermehrt zum Einsatz kommt. In den letzten Jahren ist zudem auch die Nachfrage nach chemisch reinem Quarz für die Gewinnung von Silizium in Folge des Photovoltaik-Booms deutlich gestiegen. Einige Kies- und Schotterlagerstätten im Voralpenraum enthalten einen hohen Anteil an chemisch sehr reinem Quarzkies, der grundsätzlich als Rohstoff für die Polysiliziumherstellung geeignet ist. Chemisch störende Begleitminerale müssen dazu aus dem Rohgut abgetrennt werden. Dies ist mit klassischen Aufbereitungsverfahren aber nur bedingt möglich. Am Beispiel einer durchgeführten Machbarkeitsstudie soll der Einsatz von VIS-basierter Sortierung dazu erörtert werden.

6.4.2.1 Sortiergut- und Zielqualitäten

Beim Roh- bzw. Aufgabegut des gegenständlichen Fallbeispiels Quarzkies-89/2013 handelt es sich überwiegend um hochwertigen Quarzkies (SiO_2) aus dem Voralpenraum. In Abstimmung mit dem Aufbereiter wurden die in Tabelle 25 angeführten Merkmalsklassen definiert. Die Muster sind zur Darstellung des unterschiedlichen visuellen Erscheinungsbildes trocken und mit Wasser benetzt abgebildet.

| | | | |
|---------|-----------------------------------|----------------------------|---|
| trocken | | | |
| nass | | | |
| | MK1: Quarz weiß | MK2: Nebengestein hellgrün | MK3: Nebengestein hellgrau |
| trocken | | | |
| nass | | | |
| | MK4: Quarz/Nebengestein hellbraun | MK5: Nebengestein hellrot | MK6: Quarz weiß mit kleinen Einschlüssen und/oder partieller Verfärbung |

Tabelle 25: Merkmalsklassendefinition - Quarzkies-89/2013

Weißer Quarzobjekte (MK1) repräsentieren die höchste Qualitätsstufe. Auf Basis von seitens des Aufbereiters zur Verfügung gestellten chemischen Analysen können störende Begleitminerale und Einlagerungen anderer Elemente im Quarz mit Verfärbungen verknüpft (MK2 bis MK5) und als indirektes Qualitätsmerkmal genutzt werden. Beispielsweise führt ein geringer Fe-Anteil von < 1 % in der SiO₂-Matrix in Folge von Verwitterungsprozessen zu oberflächlich brauner Verfärbung (Teilmenge von MK4). Die Kornspanne reicht von 2 bis 25 mm. Der Schlechtgutgehalt von 12 bis 15 % (MK2 bis MK5) im Aufgabegut soll durch die Sortierung auf unter 2 % fallen. Das Masseausbringen in die Gutfraktion soll dabei > 80 % betragen.

6.4.2.2 Optische Eigenschaften und Detektionstechnik

Wie die vergleichenden Aufnahmen aus Tabelle 25 zeigen, verändert der oberflächliche Wasserfilm bei nassen Objekten den visuellen Eindruck teils erheblich. Dies ist auf Beugungs-, Reflexions- und Streueffekte zurückzuführen, welche insbesondere bei der sensorgestützten Sortierung zu berücksichtigen sind.

Einerseits beeinflusst ein Wasserfilm zumeist die Farbintensität sowie -sättigung positiv und ermöglicht eine bessere farbliche Differenzierung, wie die Farbraumlage¹⁷ ausgewählter Musteraufnahmen eines MINEXX-Systems in Abbildung 74 zeigt.

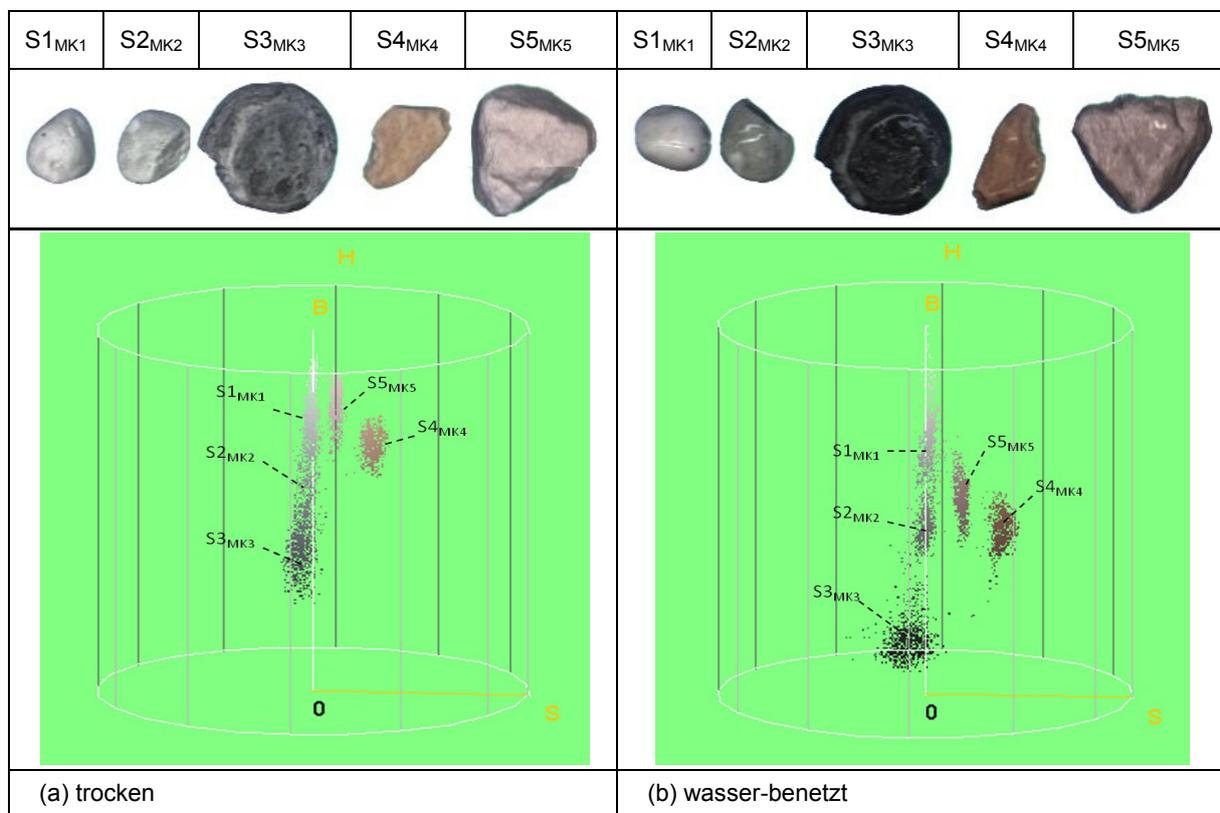


Abbildung 74: Einfluss von Wasser (H₂O) auf die Intensität (B) und Sättigung (S)

Bei benetzten dunklen Objekten wird die Intensität B¹⁸ des reflektierten Lichtes stärker reduziert (z.B.: MK3) als bei hellen bzw. weißen Objekten. Dies entspricht einer unterschiedlichen Häufungsmittelwertverschiebung. Die Farbsättigung S wird bei Benetzung verstärkt und Farbnuancen sind deutlich besser detektierbar (z.B.: MK1 vs. MK2 und MK5). Wie die Analysen zeigen, wird der Farbwinkel kaum beeinflusst. Die Effekte der Benetzung auf

¹⁷ Erstellt mit Freeware „ImageJ“, Version 1.48

¹⁸ B...Brightness im HSB-Raum entspricht V...Value im HSV-Raum

die Farbsignale ist auch aus der Wirkung auf die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen RGB-Messkanäle ersichtlich und im Anhang H mit wesentlichen Kennwerten abgebildet.

Andererseits kann es an glatten bzw. polierten Oberflächenbereichen und/oder Konturübergängen, insbesondere in Kombination mit wenig diffuser LED-Beleuchtung, zu starken Reflexionen bzw. Spiegelungen und Übersteuerungen der entsprechenden Detektorbereiche kommen. Dies führt, wie in Abbildung 75 dargestellt, zu einer Signalverfälschung und kann nur durch sorgfältige Abstimmung der Beleuchtung, wie in 5.3.2.3 bereits beschrieben wurde, minimiert werden.

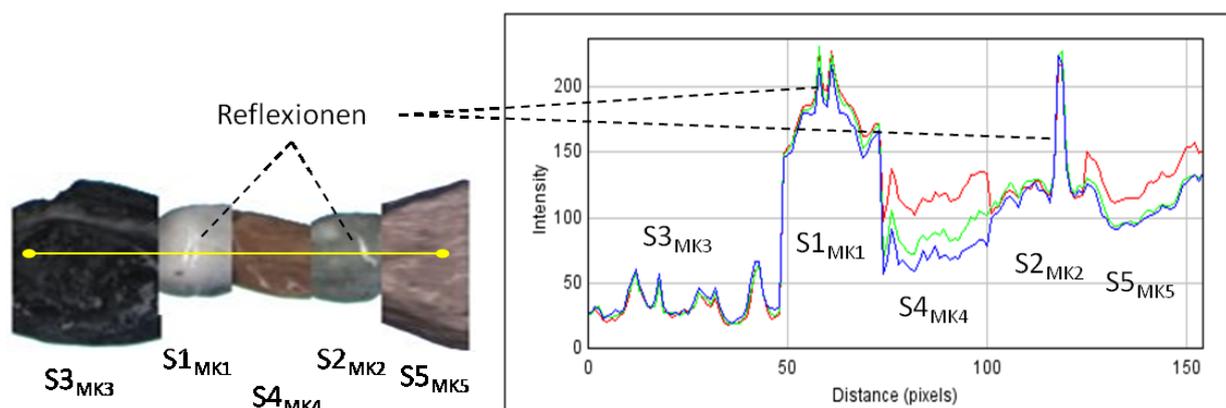


Abbildung 75: Reflexionen (rechts) und deren Auswirkung im RGB-Intensitätsprofil (links)

6.4.2.3 Konditionierung und Sortierprozess

In der Regel ist eine benetzte Oberfläche für die Detektion von Vorteil, sodass die Sortierung wie im behandelten Fallbeispiel nach einem bereits existierenden Waschprozess positioniert werden kann. Was jedoch für die Detektion von Vorteil ist, kann insbesondere bei kleiner Korngröße und Einsatz eines Rutschensortierers für das Transportverhalten von Nachteil sein. Zu hohe Restfeuchtigkeit führt zu Verschleppung von Wasser und Schmutz auf die Rutschenoberfläche. Die Gleiteigenschaften werden örtlich und zeitlich verändert. Die Varianz der Objektgeschwindigkeit steigt dadurch massiv und wird unstetig. Die kritische Korngrößengrenze ist abhängig von Kornform und Rohgutart. Für das gegenständliche Sortiergut wurde im benetzten Zustand eine Grenzkorngröße von 4 mm ermittelt und der Prozess, wie in Abbildung 76 abgebildet, entsprechend konzeptioniert. Die Siebmaschine (1) klassiert das gewaschene Aufgabegut in zwei Sortierfraktionen und eine Feinfraktion. Zudem erfolgt eine Entwässerung der beiden Sortierfraktionen. Die Aufgaberinnen (2.1, 2.2) sind idealerweise mit einem Lochbodeneinsatz ausgerüstet, um das Sortiergut zusätzlich zu

entwässern und die Verschleppung von Wasser sowie Schmutz auf die Rutsche der Sortiermaschinen (3.1, 3.2) zu minimieren.

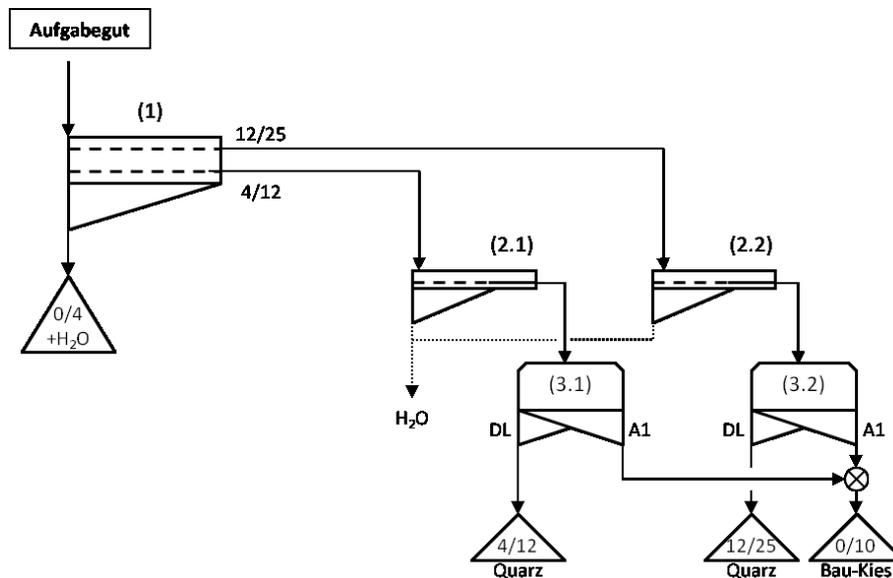


Abbildung 76: Prozessschema - Herstellung hochwertiger Quarzkiesfraktionen

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass ein Wassereintrag beim Einsatz von Bandsortierern weniger kritisch ist. Dabei sind spezifische Ausführungsanforderungen wie ein kleiner abgabeseitiger Trommeldurchmesser, seitliche Bandabdichtungen und Abreinigungsvorrichtungen zu berücksichtigen. Sofern die optische Unterscheidbarkeit der Merkmalsklassen im trockenen Zustand gegeben ist, ist von einer Benetzung Abstand zu nehmen. Insbesondere bei der Sortierung von feinkörnigem Rohgut < 10 mm kann eine Trocknung als Konditionierungsschritt, wie beispielsweise in 6.4.1.1 für die Altglasaufbereitung beschrieben, erforderlich sein.

6.4.2.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsserie zur Prozesssimulation nach Abbildung 76 wurde auf einem MINEXX VIS-Testsystem mit Serienausrüstung und weißem Hintergrund im Technikum der Fa. Binder+Co AG durchgeführt. Das Probenmaterial wurde in einer bestehenden Anlage des Interessenten nass aufbereitet, entwässert und klassiert (4/12 mm und 12/25 mm) beige stellt. Die Farbklassengrenzen wurden anhand von benetzten Musterkörnungen definiert und darauf basierend eine geeignete Farbklassifikationstabelle in Abstimmung mit dem Interessenten

erstellt. Das Testsystem wurde entsprechend der jeweiligen Sortieraufgabe parametrier¹⁹. Die Analyse der Versuchschargen erfolgte mittels Handklaubung.

6.4.2.5 Ergebnisse

Aus den Versuchsergebnissen zu Pos.3.1 (Tabelle 26) ergibt sich für die Fraktion 4/12 mm eine Gehaltssteigerung der hochwertigen Quarzklassen (MK1, MK6) von 85,29 % auf 98,26 % bei einem sehr hohen Masseausbringen von 98,15 %. Der Trenngrad ist mit 88,05 % im Vergleich zur KSP-Abtrennung, wie in 6.4.1.3.3/Versuch zu Pos. 12.1 dokumentiert, deutlich kleiner. Dies ist auf die Kornform, die vergleichsweise geringen Farbunterschiede zwischen den Merkmalsklassen und den kleinen zugeordneten Farbraumbereichen zurückzuführen. Die Zielvorgaben konnten aber erreicht werden.

| Aufgabe: Quarz 4/12 mm | | | |
|------------------------|--------|----------------------|------------------------|
| | M [g] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| MK1; MK6 | 2044,8 | 85,29 | |
| MK2; MK3; MK4; MK5 | 352,6 | 14,71 | |
| Summe | 2397,4 | 100,00 | |

| | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----|-------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | --- | [sec] |
| 3.1- A1: MK2+MK3+ MK4+ MK5 | Kapazität auf 480mm: | --- | [t/h] |
| | Kapazität auf 1000mm: | --- | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|-----------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [g] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| MK1; MK6 | 37,8 | 10,65 | | 1,85 | 2007 | 98,26 | | 98,15 |
| MK2; MK3; MK4; MK5 | 317 | 89,35 | | 89,90 | 35,6 | 1,74 | | 10,10 |
| Summe | 354,8 | 100,00 | | | 2042,6 | 100,00 | | |
| r _{m,j} [%] | 14,80 | | | | 85,20 | | | |

Tabelle 26: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.1

Aus den Versuchsergebnissen zu Pos.3.2 (Tabelle 27) ergibt sich für die gröbere Fraktion 12/25 mm eine Gehaltssteigerung der hochwertigen Quarzklassen (MK1, MK6) von 79,78 % auf 95,18 % bei einem ebenfalls sehr hohen Inhaltsausbringen von 97,48 %. Der Trenngrad liegt auch hier bei einem guten Wert von 78 %.

¹⁹ MMI-SW: V 1.9.1.2, Sortierrechner-SW: V 1.4.8

| Aufgabe: Quarz 12/25 mm | | | |
|-------------------------|-------|----------------------|------------------------|
| | M [g] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| MK1; MK6 | 5793 | 79,78 | |
| MK2; MK3; MK4; MK5 | 1468 | 20,22 | |
| Summe | 7261 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | --- | [sec] |
|-------------------------------|-----------------------|-----|-------|
| 3.2- A1: MK2+MK3+ MK4+ MK5 | Kapazität auf 480mm: | --- | [t/h] |
| | Kapazität auf 1000mm: | --- | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|-----------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [g] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| MK1; MK6 | 146 | 10,99 | | 2,52 | 5647 | 95,18 | | 97,48 |
| MK2; MK3; MK4; MK5 | 1182 | 89,01 | | 80,52 | 286 | 4,82 | | 19,48 |
| Summe | 1328 | 100,00 | | | 5933 | 100,00 | | |
| r _{m,j} [%] | 18,29 | | | | 81,71 | | | |



Tabelle 27: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.2

Wie aus den fotografischen Abbildungen der Sortierfraktionen ersichtlich ist, gestaltet sich die visuelle Zuordnung durchaus schwierig und ist auch mit einer gewissen Unschärfe behaftet.

Obwohl der Schlechtgutgehalt mit 20 % deutlich über der Aufgabegutspezifikation liegt, konnten die Zielvorgaben bezüglich Schlechtgutgehalt der Quarzfraktion beinahe und das Masseausbringen voll erreicht werden. Auf Basis der bei der Rohgutanalyse ermittelten Flächendichten wurden für diese Applikation maximale Durchsatzleistungen von 14 t/hm für die Fraktion 4/12 mm und 30 t/hm für die Fraktion 12/25 mm ermittelt.

6.4.3 Quarzsotter

In Ergänzung zum zuvor behandelten Fallbeispiel wird im Folgenden der Einsatz von VIS-basierter Sortierung bei der Aufbereitung von Quarzsotter aus einer anderen Lagerstätte in Deutschland erörtert. In der Aufbereitungsanlage wurden bis zum Jahr 2013 Teilmengen des Kornbereiches 32/90 mm von Hand sortiert. Die Produkte werden für dekorative Zwecke im Außen- und Gartenbereich sowie in der Herstellung von Steinzeug wie Arbeitsplatten oder Pflastersteinen eingesetzt. Umfangreiche Machbarkeitsuntersuchungen und die

Weiterentwicklung der Maschinenteknologie führten letztlich zu einer erfolgreichen industriellen Installation.

6.4.3.1 Sortiergut- und Zielqualitäten

Beim Roh- bzw. Aufgabegut des gegenständlichen Fallbeispiels Quarzschotter-72/2012 handelt es sich überwiegend um hochwertigen Quarzschotter (SiO_2) mit Nebengestein aus einer Lagerstätte in Deutschland. In Abstimmung mit dem Aufbereiter wurden die in Tabelle 28 angeführten Merkmalsklassen definiert. Der Sortierung ist eine existierende Trommelwäsche vorgelagert. Die Objekte bzw. Steine werden, wie abgebildet, gewaschen und benetzt der Sortierung zugeführt.

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| MK1: Quarz weiß, hellgrau | MK2: Quarz, oberflächliche partielle rotbraun verfärbt | MK3: Quarz, stark verfärbt und Nebengestein, grau, grün, inklusive einseitiger Verwachsungen |
|  |  |  |
| MK3: einseitige Verwachsungen und Verfärbungen – Lage/Ansicht A | MK3: einseitige Verwachsungen und Verfärbungen – Lage/Ansicht B | MK4: Sandstein und Konglomerate rotbraun |

Tabelle 28: Merkmalsklassendefinition Quarzschotter-72/2012

Weißer und hellgraue Quarzobjekte (MK1) repräsentieren auch hier die höchste Qualitätsstufe. Der Gehalt an MK1 im Aufgabegut liegt aber nur bei $< 5\%$. Überwiegend besteht das Aufgabegut aus an den Oberflächen partiell rotbraun verfärbten Quarzobjekten (MK2), welche zumeist auch angebrochen und Rissen übersät sind. Der Gehalt der Schlechtklasse (MK3 und MK4) liegt zwischen 5 bis 10 %. Insbesondere rotbrauner Sandstein und Konglomerate sind

störend und müssen aussortiert werden. Als wesentliche Zielsetzung soll die Handklaubung ersetzt und Quarzschotter mit Objekten der Klasse MK1 und MK2 hergestellt werden.

6.4.3.2 Optische Eigenschaften und Detektionstechnik

In Bezug auf die optischen Eigenschaften gelten grundsätzlich die bereits unter 6.4.2.2 angeführten Aspekte. Bei den Untersuchungen zeigte sich zudem, dass - bedingt durch die zumeist partiellen Verfärbungen und Anhaftungen - eine einseitige Detektion zu lagebedingten Fehlklassifizierungen führt. In Tabelle 28 sind dazu ausgewählte Muster aus unterschiedlicher Perspektive abgebildet. Mittels Versuchsreihen wurde ein damit verbundener statistischer Fehler von etwa 10 % ermittelt.

Eine zweiseitige Detektion wurde entsprechend der in Abbildung 77 dargestellten Konfiguration entwickelt und in einem ersten Schritt als Funktionsmuster, wie in Abbildung 78 (a) abgebildet, realisiert. Dazu wurde ein spezielles Beleuchtungsmodul (LED1 und LED3) entwickelt, bei welchem ein Teilbereich eines Auflichtbalkens, wie in Abbildung 78 (b) dargestellt, als farblich anpassbarer Hintergrund für die gegenüberliegende Kamera dient. Die durchaus komplexe Baugruppenanordnung erforderte zudem die Entwicklung von mechanisch und softwaretechnisch ausgeklügelten Justage- und Synchronisationseinrichtungen, insbesondere für die Ausrichtung der optischen Achsen und Beleuchtungswinkel.

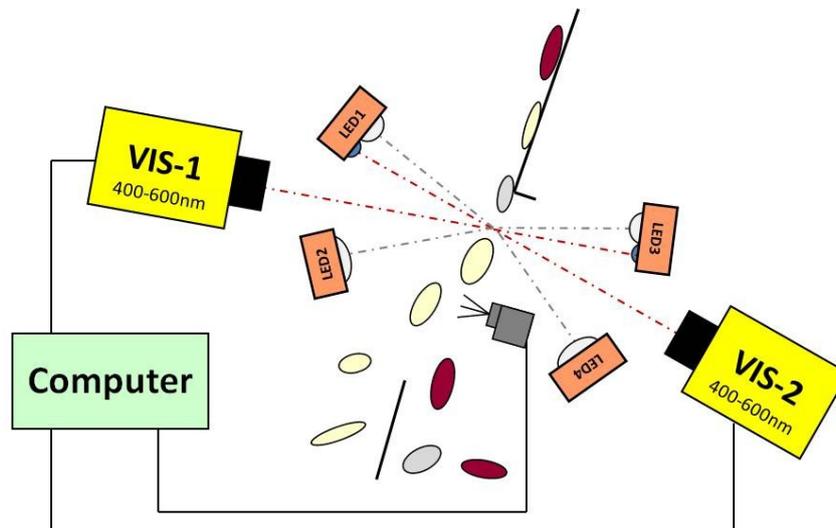


Abbildung 77: Baugruppenkonfiguration einer zweiseitigen Detektion

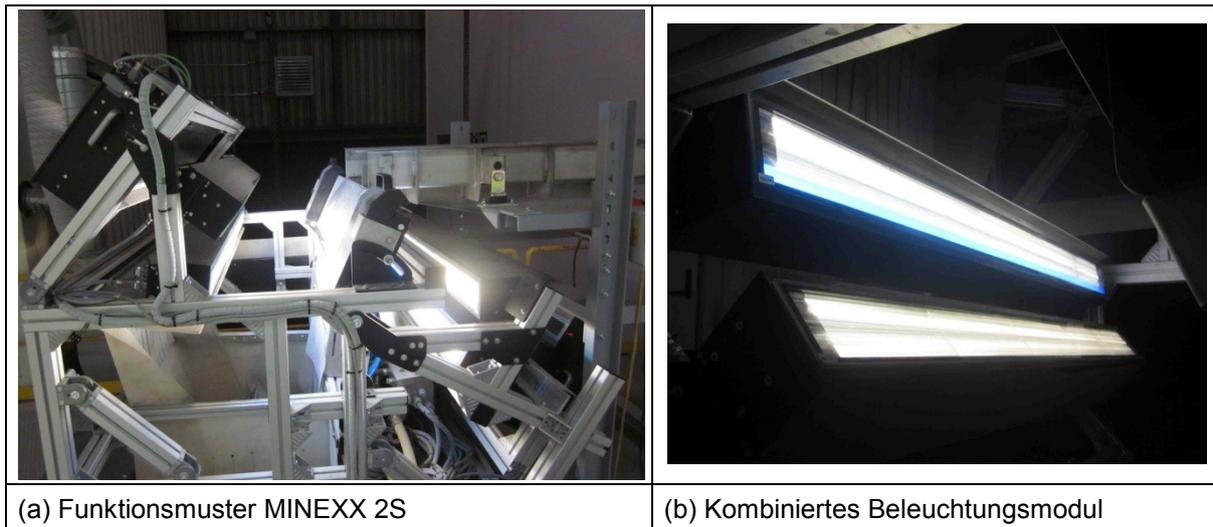


Abbildung 78: Funktionsmuster für zweiseitige Detektion und Sortierung

Für das gegenständliche Sortiergut wurde die Farbe Blau als gut geeignete Hintergrundfarbe ermittelt und eingesetzt. In Abbildung 79 sind gleichzeitig generierte Systemaufnahmen von Objekten (MK3) aus Tabelle 28 dargestellt. Gut zu erkennen sind die detektierten Unterschiede in den Verwachsungsverhältnissen in Abhängigkeit von der Detektionsrichtung. Über eine neuentwickelte Sensorfusionstechnik werden die beiden Bilddatenströme synchronisiert und eine gesamtheitliche Klassifikation durchgeführt. Die Klassifikationssicherheit bzw. Trennschärfe ist somit auch bei Rohgut mit lokalen Verwachsungen oder Anhaftungen gegeben. Dem gegenüber stehen eine höhere Systemkomplexität und höhere Maschinenkosten.

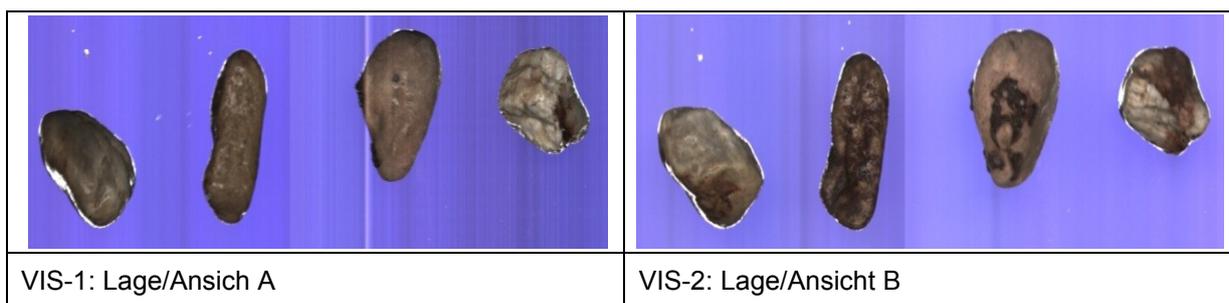


Abbildung 79: Systemaufnahmen mit Funktionsmuster MINEXX 2S

6.4.3.3 Effektorik und Trennraum für schwere große Objekte

Für die zu sortierenden Kornbereiche 31,5/45, 45/63 und 63/90 mm betragen die mittleren Objektmassen - abgeleitet aus Tabelle 29 - 81,3, 248,7 und 752,3 g. In Vorversuchen hat sich die Ablenkung bei Einsatz der effektorischen Standardausrüstung mit einer Ventilleiste insbesondere für Objekte mit einer Korngröße von > 75 mm bzw. Masse von > 500 g als

kritisch dargestellt. Die deutlich geringe Ablenkung von großen Objekten ist auf die limitierte Impulsenergie und das ungünstigere Verhältnis von Angriffsfläche zur Masse zurückzuführen. Ausgehend von der sehr vereinfachten Betrachtungsweise, dass die Angriffsfläche einer Kreisfläche entspricht, wurde das mittlere Verhältnis k von Angriffsfläche zur Objektmasse ermittelt. Die Ergebnisse sind dazu für Quarzkies mit kubischer Objektform kornklassenbezogen in Tabelle 29 abgebildet. Der Kennwert k entwickelt sich verkehrt proportional zur mittleren Korngröße. Im Vergleich dazu ist der Verlauf dieser Kennzahl bei Rohgut mit plattiger bzw. flacher Objektform wie Glasscherben deutlich konstanter. So liegt $k_{\text{Glas, 31,5-45mm}}$ mit $50 \text{ mm}^2/\text{g}$ noch deutlich höher als $k_{\text{Quarz, 31,5-45mm}}$ mit $14,1 \text{ mm}^2/\text{g}$. Für kleine Körnungen ist der Kennwert k ähnlich. Grundsätzlich gilt, je kleiner diese Kennzahl ist, desto geringer ist die pneumatische Ablenkung.

| Korngröße [mm] | mittlere Korngröße [mm] | mittlere Angriffsfläche [mm ²] ²⁰ | mittlere Masse [g] ²¹ | k [mm ² /g] |
|-------------------|-------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------|
| 4 – 5,6 | 4,8 | 18,1 | 0,25 | 72,3 |
| 5,6 - 8 | 6,8 | 36,3 | 0,55 | 66,0 |
| 8 – 11,2 | 9,6 | 72,3 | 1,6 | 46,4 |
| 11,2 - 16 | 13,6 | 145,2 | 5,5 | 26,3 |
| 16 – 22,4 | 19,2 | 289,4 | 13,1 | 22,1 |
| 22,4 – 31,5 | 26,95 | 570,1 | 30,8 | 18,5 |
| 31,5 - 45 | 38,25 | 1148,5 | 81,3 | 14,1 |
| 45 - 63 | 54 | 2289,1 | 248,7 | 9,2 |
| 63 - 90 | 76,5 | 4594,0 | 752,3 | 6,1 |
| 90 - 125 | 107,5 | 9071,7 | 1682,1 | 5,4 |

Tabelle 29: Verhältnis von Angriffsfläche zur Objektmasse (k) für Quarzkies bezogen auf Kornklasse

Die alleinige Steigerung der Impulskraft durch Erhöhung des Arbeitsdruckes der Druckluft von 6 auf 10 bar und der Durchflussmenge erweist sich nur bedingt als zielführend. Einerseits führt die spontane einseitige Anströmung des Objektes beim Eintritt in die Ausblaszone, insbesondere bei platten und/oder gestreckten Objekten, vermehrt zu Kipp- bzw. Ausweichbewegung. Die Impulsenergie wird dabei teilweise in Rotationsenergie umgewandelt und die Ablenkung auf das Objekt bzw. den Schwerpunkt reduziert sich. Andererseits werden kleinere Objekte extrem stark abgelenkt und gegen die Rückwand geschleudert. Damit sind ein höherer Verschleiß und eine stärkere Zerkleinerung der Auswurffractionen

²⁰ Kreisfläche der mittleren Korngröße

²¹ Analysenwerte

verbunden. Zudem prallen Auswurfobjekte auch vermehrt in den Durchlaufschacht zurück, dies reduziert auch die effektorische Trennschärfe bei ansonsten gut sortierbaren Kornbereichen.

Mittels softwareunterstützter Simulation²² wurde eine alternative Anordnung mit zwei eng hintereinander positionierten Ventilleisten, die parallel angesteuert werden, als vorteilhaft identifiziert. In Abbildung 80 ist ein darauf basierender Testaufbau dargestellt, mit welchem die Simulationsergebnisse evaluiert wurden. Die Impulskraft kann bei der gewählten Anordnung mit entsprechender zeitlicher und örtlicher Ansteuerung auch bei großen Objekten in Bewegungsrichtung x,z schwerpunktsymmetrisch und damit effektiver auf die Anströmfläche verteilt werden. Kleinere Objekte bzw. Objekte aus dem unteren gegenständlichen Kornbandbereich werden im Standardmodus mit einer Ventilleiste angeblasen. In Abbildung 80 sind dazu seitlich ergänzend Ansteuerungsbeispiele dargestellt.

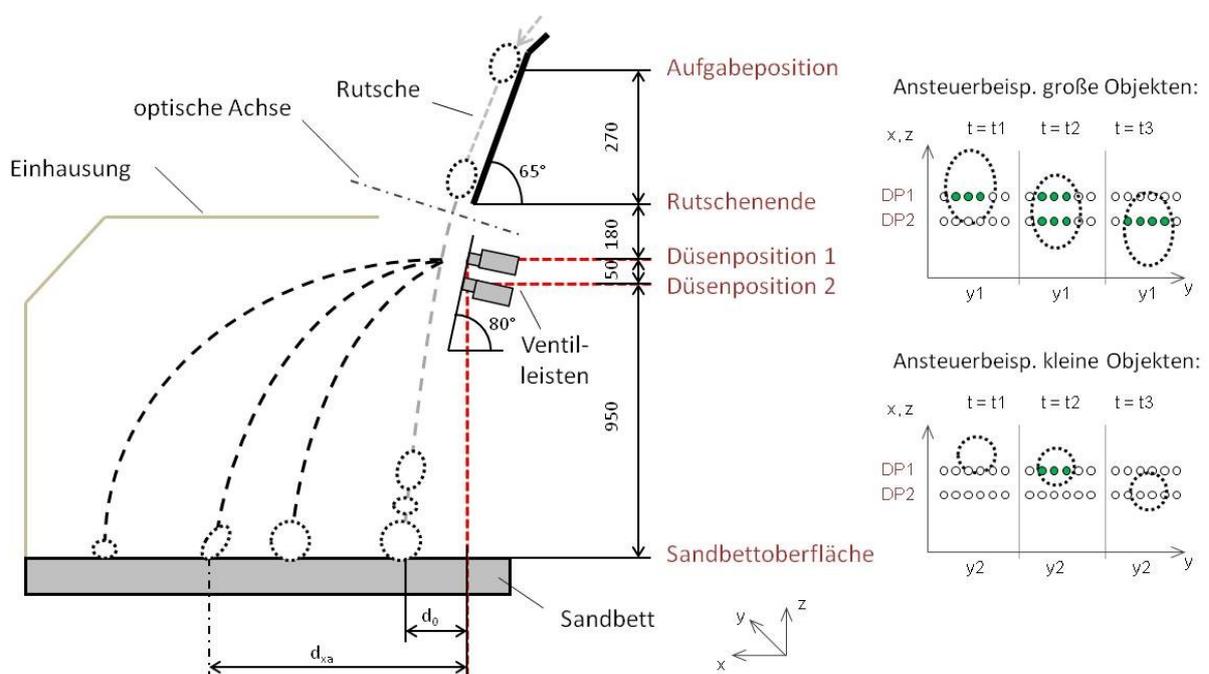


Abbildung 80: Testaufbau zur Evaluierung der Ablenkung mit einer und zwei Ventilleisten

Ausgewählte Versuchsergebnisse sind dazu für flache bzw. platte Objekte in Abbildung 81 und für kubische Objekte in Abbildung 82 dargestellt. In den Diagrammen ist die mittlere Ablenkeffizienz bzw. Ablenkdistance d_{xa} von Objekten bzw. Steinen mit einem Gewicht von ca. 0,5 bis 3 kg bei einreihiger (AW-1-VR) und zweireihiger (AW-2-VR) Ansteuerung angegeben.

²² Simuliert mit Solid Works 2014 - Motion

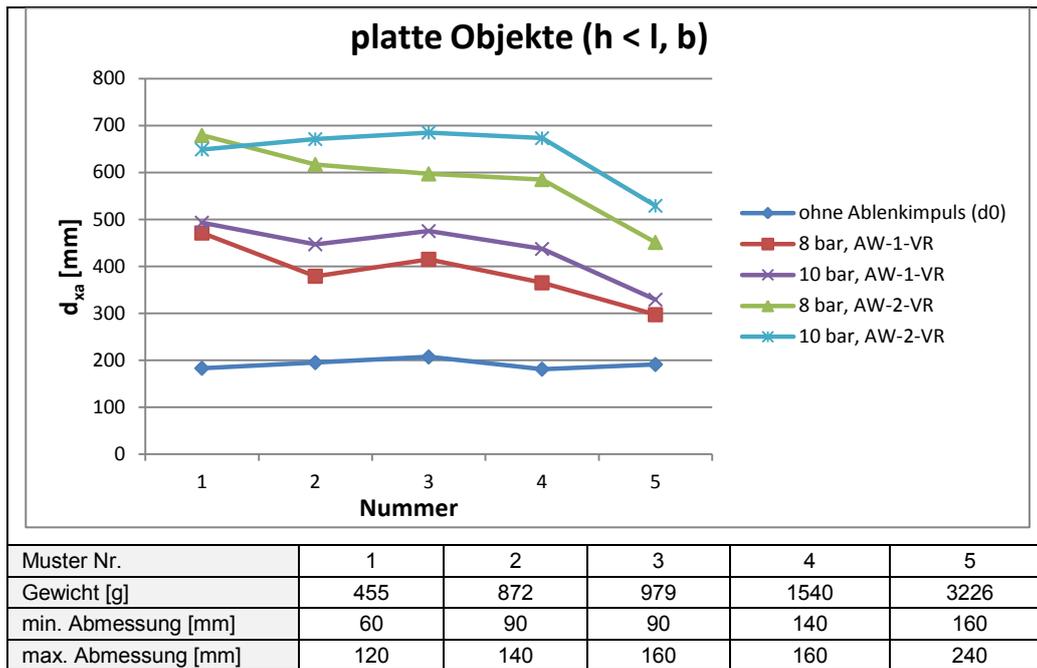


Abbildung 81: Ablenkung für flache bzw. platte Objekte

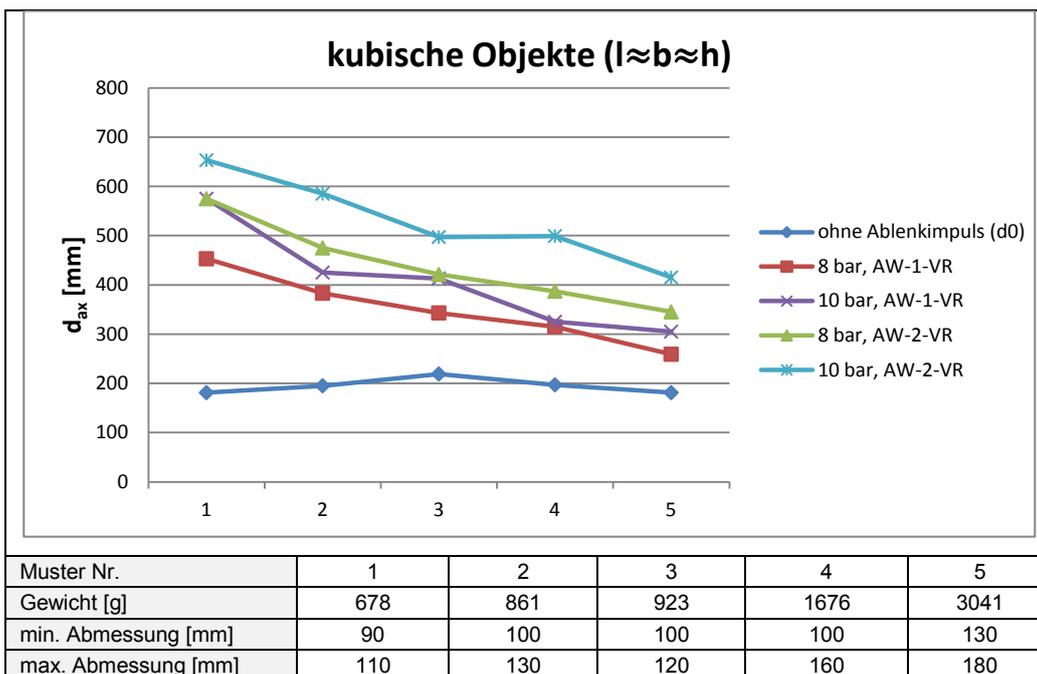


Abbildung 82: Ablenkung für kubische Objekte

Zudem wurden die Versuchsreihen mit Arbeitsdrücken von 8 und 10 bar durchgeführt, da bestehende Druckluftanlagen sehr häufig auf 8 bar begrenzt sind. Eine Aufrüstung der Druckluftanlage ist zumeist mit erheblichen Zusatzkosten, welche einsatzentscheidend sein können, verbunden. Wie aus den Diagrammen ersichtlich ist, werden die Objekte mit zweireihiger Ansteuerung tendenziell deutlich effizienter abgelenkt. Die Ablenkdistanz ist bei flachen Steinen sogar bei einem Arbeitsdruck von 8 bar signifikant größer als bei einreihiger Ansteuerung mit einem Arbeitsdruck von 10 bar. Für kubische Steine ist der positive Effekt

zwar geringer, aber ebenfalls eindeutig gegeben. Mit der beschriebenen Technik ergibt sich über den gesamten Kornbereich eine vergleichsweise konstante Ablenkdistanz. Dadurch kann der Trennraum sehr kompakt konstruiert werden.

6.4.3.4 Konditionierung und Sortierprozess

Die einstufige, sensorgestützte Sortierung kann im behandelten Fallbeispiel einer bestehenden Nassreinigung mit Trommelwäscher nachgelagert werden. Die Nassreinigung war auch bereits für die praktizierte Handklaubung erforderlich. Für den zu sortierenden Kornbereich 31,5/90 mm ist der Einsatz eines Rutschensortierers bezüglich des Transportverhaltens unkritisch. Jedoch empfiehlt es sich auch in diesem Einsatzfall, die Aufgaberinne mit einem Lochbodeneinsatz auszurüsten, um die Verschleppung von Wasser und Schmutz in den Sortierer zu minimieren.

6.4.3.5 Versuchsdurchführung

Die Versuchsserie wurde, auf dem in Abbildung 78 (a) dargestellten, Funktionsmuster mit zweireihiger Ventilleiste und weiterentwickeltem Ansteuermodus durchgeführt. Das Probenmaterial wurde in der bestehenden Anlage des Interessenten gewaschen, entwässert, klassiert und für die Versuche beigestellt. Die Farbklassengrenzen und Verwachsungsklassen wurden anhand von benetzten Musterscherben definiert und darauf basierend eine geeignete Farbklassifikationstabelle in Abstimmung mit dem Interessenten erstellt. Das Testsystem wurde entsprechend der jeweiligen Sortieraufgabe parametrier²³. Die Analyse der Versuchschargen erfolgte mittels Handklaubung.

6.4.3.6 Ergebnisse

Im Folgenden sind repräsentative Versuchsergebnissen aus einem Vergleichstest zwischen einer Sortierung mit MINEXX-Standardkonfiguration (einseitige Detektion, einreihige Effektorik mit Arbeitsdruck von 10 bar) und der weiterentwickelten 2S-Konfiguration (zweiseitige Detektion, zweireihige Effektorik mit Arbeitsdruck von 8 bar) dargestellt.

Aus Tabelle 30 ergibt sich bei Standardkonfiguration - insbesondere für die Bergeklasse MK3 - ein sehr geringes Inhaltsausbringen von 51,41 % in die Bergefraktion. Dem gegenüber ist das Inhaltsausbringen der Gutklasse MK2 mit 10,13 % in der Bergefraktion verhältnismäßig hoch. Insgesamt liegt der Trenngrad nach (5.10) bezogen auf die wesentliche Gutklasse MK2 und Bergeklasse MK3 nur bei 41,28 %. Zurückzuführen ist dies auf die, bereits in 6.4.3.2 und 6.4.3.3 erörterten, optischen und effektorischen Aspekte in Bezug auf das Rohgut.

²³ MMI-SW: V 1.9.1.2, Sortierrechner-SW: V 1.4.8

| Aufgabe: Quarz 31,5/90 mm | | | |
|---------------------------|--------|----------------------|------------------------|
| | M [g] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| MK1 | 8179 | 5,00 | |
| MK2 | 146384 | 89,53 | |
| MK3 | 6985 | 4,27 | |
| MK4 | 1950 | 1,19 | |
| Summe | 163498 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | | [sec] |
|-----------------------------|-----------------------|--|--------|
| Test 1: Auswurf MK3; MK4 | Kapazität auf 480mm: | | [t/h]. |
| 12.1 - A2: --- | Kapazität auf 1000mm: | | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [g] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| MK1 | 608 | 2,94 | | 7,43 | 7571 | 5,30 | | 92,57 |
| MK2 | 14824 | 71,73 | | 10,13 | 131560 | 92,11 | | 89,87 |
| MK3 | 3591 | 17,38 | | 51,41 | 3394 | 2,38 | | 48,59 |
| MK4 | 1642 | 7,95 | | 84,21 | 308 | 0,22 | | 15,79 |
| Summe | 20665 | 100,00 | | | 142833 | 100,00 | | |
| r _{m,j} [%] | 12,64 | | | | 87,36 | | | |

Tabelle 30: Versuchsdaten Quarzsotter-72/2012 mit Standardkonfiguration

| Aufgabe: Quarz 31,5/90 mm | | | |
|---------------------------|--------|----------------------|------------------------|
| | M [g] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| MK1 | 8129 | 5,01 | |
| MK2 | 145484 | 89,59 | |
| MK3 | 6825 | 4,20 | |
| MK4 | 1942 | 1,20 | |
| Summe | 162380 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | | [sec] |
|-----------------------------|-----------------------|--|--------|
| Test 2: Auswurf MK3; MK4 | Kapazität auf 480mm: | | [t/h]. |
| 12.1 - A2: --- | Kapazität auf 1000mm: | | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [g] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| MK1 | 358 | 2,29 | | 4,40 | 7771 | 5,30 | | 95,60 |
| MK2 | 8324 | 53,27 | | 5,72 | 137160 | 93,46 | | 94,28 |
| MK3 | 5001 | 32,01 | | 73,27 | 1824 | 1,24 | | 26,73 |
| MK4 | 1942 | 12,43 | | 100,00 | 0 | 0,00 | | 0,00 |
| Summe | 15625 | 100,00 | | | 146755 | 100,00 | | |
| r _{m,j} [%] | 9,62 | | | | 90,38 | | | |




Tabelle 31: Versuchsdaten Quarzsotter-72/2012 mit 2S-Konfiguration

Aus Tabelle 31 ergibt sich bei 2S-Konfiguration für die Bergeklasse MK3 ein erheblich höheres Masseausbringen von 73,27 % für die Bergefraktion. Dem gegenüber konnte das Inhaltsausbringen der Gutklasse MK2 mit 5,72 % in die Bergefraktion fast halbiert werden. Der Trenngrad liegt bezogen auf die wesentliche Gutklasse MK2 und Bergeklasse MK3 nun bei 67,55 %. Insbesondere der Gehalt der Gutklasse MK2 im Gutprodukt bzw. Durchlauf konnte von 89,87 % (Tabelle 30) auf 93,46 % (Tabelle 31) gesteigert werden.

6.4.4 Quarzbruch

Eine weitere verbreitete Aufgabenstellung ist die Sortierung von Quarzbruch. Wie bei Quarzkies oder -schotter ist die Erzeugung von Endprodukten mit hoher Farbreinheit oder chemischer Reinheit gefordert.

6.4.4.1 Sortiergut und Zielsetzungen

Beim Roh- bzw. Aufgabegut im dargestellten Fallbeispiel Quarz-14/2010 handelt es sich überwiegend um hochwertigen Quarzbruch (SiO_2) der Körnung 0/50 mm. In Abstimmung mit dem Aufbereiter wurden die in Tabelle 32 angeführten Merkmalsklassen definiert.

| | | |
|--|---|--|
| A pile of white, angular quartz fragments on a light surface. A ruler above shows a scale from 0 to 50 mm. | A pile of light yellow, angular quartz fragments on a light surface. A ruler above shows a scale from 0 to 50 mm. | A pile of light gray, angular quartz fragments on a light surface. A ruler above shows a scale from 0 to 50 mm. |
| MK1: Quarz weiß | MK2: Quarz hellgelb | MK3: Quarz hellgrau |
| A pile of light brown, angular quartz fragments on a light surface. A ruler above shows a scale from 0 to 50 mm. | A pile of dark brown, black, and reddish-brown angular fragments on a light surface. A ruler above shows a scale from 0 to 50 mm. | Four individual angular fragments of varying colors (brown, yellow, gray) on a light surface. A ruler above shows a scale from 0 to 50 mm. |
| MK4: Quarz hellbraun | MK5: Quarz und Feldspat intensive gefärbt (dunkebraun, schwarz, ...) | MK6: Feldspat gefärbt wie Quarzklassen |

Tabelle 32: Merkmalsklassendefinition Quarz-14/2010

Weißer Quarzobjekte (MK1) repräsentieren die höchste Qualitätsstufe. Einlagerungen von qualitätsbeeinflussenden Elementen, wie beispielsweise Eisen (Fe), in der Kristallmatrix

führen zu unterschiedlichen, insbesondere gelb-bräunlichen Verfärbungen (MK2 bis MK5). Zudem kommt vorzugsweise Feldspat in ähnlicher farblicher Ausprägung als störendes Begleitmineral vor (teilweise MK5 und MK6). Die flexible Erzeugung von Endprodukten mit unterschiedlicher Farbreinheit bzw. chemischer Reinheit für verschiedene Absatzmärkte wurde als Zielsetzung formuliert.

6.4.4.2 Optische Eigenschaften und Detektionstechnik

Üblicherweise werden zur Quarzbruchsortierung Oberflächenfarbsortierer mit Röhrenbeleuchtung eingesetzt. Diese sind zur Abreicherung bräunlicher und/oder dunkel gefärbter Körner (MK4 und MK5) gut geeignet. Wird eine entsprechend hochwertige Sensorik eingesetzt, ist auch die Unterscheidung von Farbnuancen (MK1, MK2, MK3) effizient möglich. Diese Systeme sind aber nicht in der Lage, den in diesem Rohgut vorkommenden, gleichfärbigen Feldspatbruch (MK6) von Quarzbruch (MK1 bis MK4) zu unterscheiden. Damit deckt sich für eine Teilmenge der Objekte die farbliche mit der chemischen Klassenzuordnung nicht.

Die spektralen Analysen zeigten, dass Feldspat durch eine vergleichsweise geringe Transmission charakterisiert ist (86). In Abbildung 83 sind dazu die Analyseergebnisse an ausgewählten Objekten dargestellt. Quarz (1) ist semitransparent, im Vergleich zu Feldspat (2) ergeben sich daher detektierbare Transmissionsunterschiede, welche bei entsprechender Gegenlichtintensität auch bei ungünstigen Kornformverhältnissen - kubisches Quarzpartikel vs. plattiges Feldspatpartikel - für eine Klassifizierung gut geeignet sind.

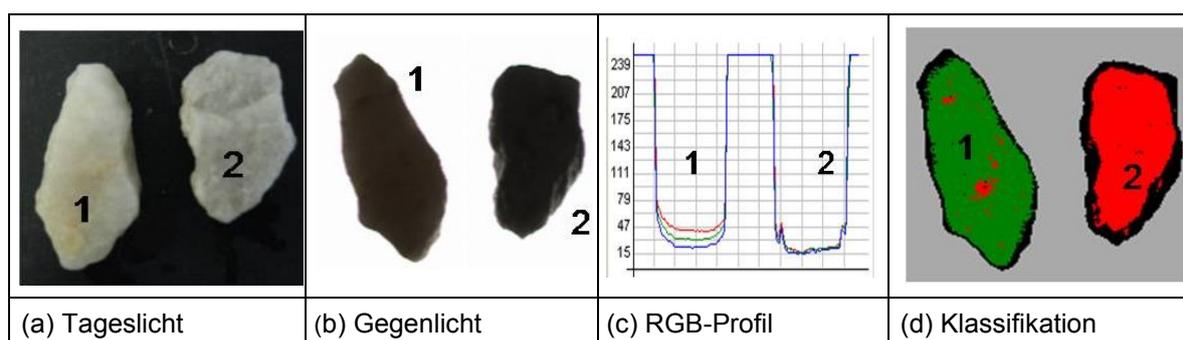


Abbildung 83: Vergleichende Darstellung der Unterschiede in den Transmissionseigenschaften von Quarz (1) vs. Feldspat (2)

Die beschriebene Methode ist bis zu einer Korngröße von ca. 50 µm anwendbar. Bei größeren Körnungen liegt die transmittierte Lichtintensität für diese Quarzart unter 1 % und reicht für eine Unterscheidung von Quarz vs. Feldspat nicht mehr aus. Für eine im Jahr 2015

angefragte Sortierung der Körnung 50/120 mm zeigen erweiterte Spektralanalysen, dass alternativ eine Detektion im NIR-Bereich zielführend ist. Siehe dazu auch Kapitel 8.1.

Die Forschungsergebnisse führten zur Weiterentwicklung der VIS-basierten Sortiertechnik, wodurch bei geringen Oberflächenfarb- und Transmissionsunterschieden der Aufgabekörner < 50 mm sehr trennscharf sortiert werden kann. Die Kernkomponenten sind dabei Beleuchtungsmodule (Hintergrund- und Auflicht) mit Power-LED's und einer neuen speziellen Diffusierungstechnik. In Abbildung 84 ist eine Auflicht- und in Abbildung 85 eine Hintergrundlichtversion der patentierten LED-Beleuchtungstechnik (87) dargestellt. Diese zeichnet sich durch steuerbare und hohe Intensität aus. Zudem können mittels der eingebauten passiven optischen Elemente wie der Diffuser-Scheibe, dem Reflexionskanal und der Fresnellinse optimale Strahlungseigenschaften bzw. Beleuchtungsbedingungen erzeugt werden.

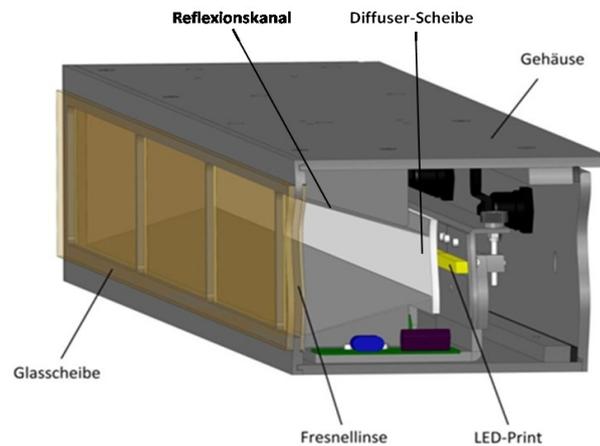


Abbildung 84: Auflicht-LED-Line mit Diffuser und Strahlaufweitung; Quelle: Binder+Co AG

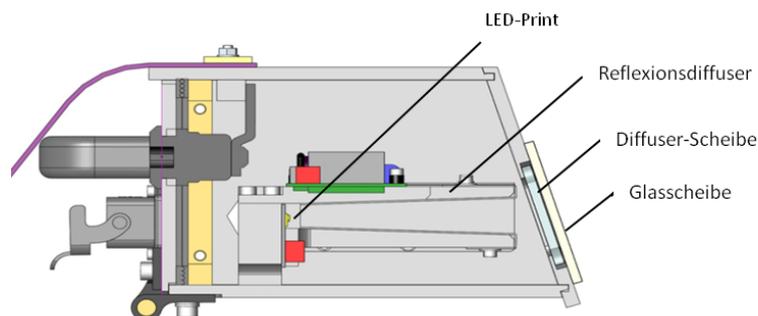


Abbildung 85: Hintergrund-LED-Line mit Reflexionsdiffuser

In Abbildung 86 ist eine Systemskizze mit der Position der Beleuchtungseinheiten dargestellt. Über eine Schnittstelle zwischen Rechereinheit und Beleuchtungseinheiten werden Intensität

und Intensitätsprofile gesteuert und aufeinander für optimierte Belichtungsverhältnisse eingestellt.

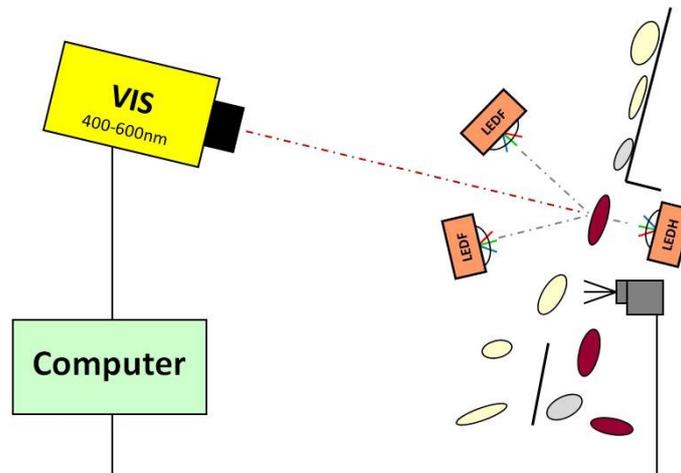


Abbildung 86: Systemskizze des Reflexion- und Transmission – Sortierers

In Abbildung 87 sind beispielhaft Objektaufnahmen und die Klassifizierungsergebnisse eines entsprechend ausgerüsteten Testsystems abgebildet.

| | Systemaufnahme original | Systemaufnahme klassifiziert (Pixel) |
|------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Testset: MK1 | | |
| Testset: MK2 | | |
| Testset: MK3+MK6 | | |

Abbildung 87: Systemaufnahmen und Klassifizierungsergebnisse²⁴ von Quarzbruchmustern

²⁴ Farbenzuordnung: MK1...grün, MK2...gelb, MK3 und MK6...grau, MK4 und MK5...braun, Unbekannt...violett, Hintergrund...schwarz

Für das Testset - MK1 und Testset - MK2 ergibt sich eine überwiegend richtige Pixelklassifizierung. Auch das anspruchsvolle kombinierte Testset - MK3+MK6 wird durch Nutzung von Semitransparenz und Oberflächenfarbe mehrheitlich richtig klassifiziert.

6.4.4.3 Konditionierung und Sortierprozess

Die Konditionierungsanforderungen sind ähnlich derer in 6.4.2.3 für Quarzkies beschrieben. Eine wasserbenetzte Oberfläche ist auch in diesem Fallbeispiel für die Detektion der Oberflächenfarbe von Vorteil. Die kritische untere Korngrößengrenze für Rutschensortierer liegt für dieses kantige und ebenflächige Rougut bei ca. 7 mm. Da das zu sortierende Schüttgut nach dem Brechen und Klassieren trocken vorliegt, ist eine zusätzliche Benetzung mit Wasser erforderlich. In Abbildung 88 ist dazu beispielsweise eine kompakte Containerlösung als 3D-Modell dargestellt. Die Benetzung erfolgt in diesem Konzept mittels aufgabeseitiger Bebrausung auf einer Siebrinne (1).

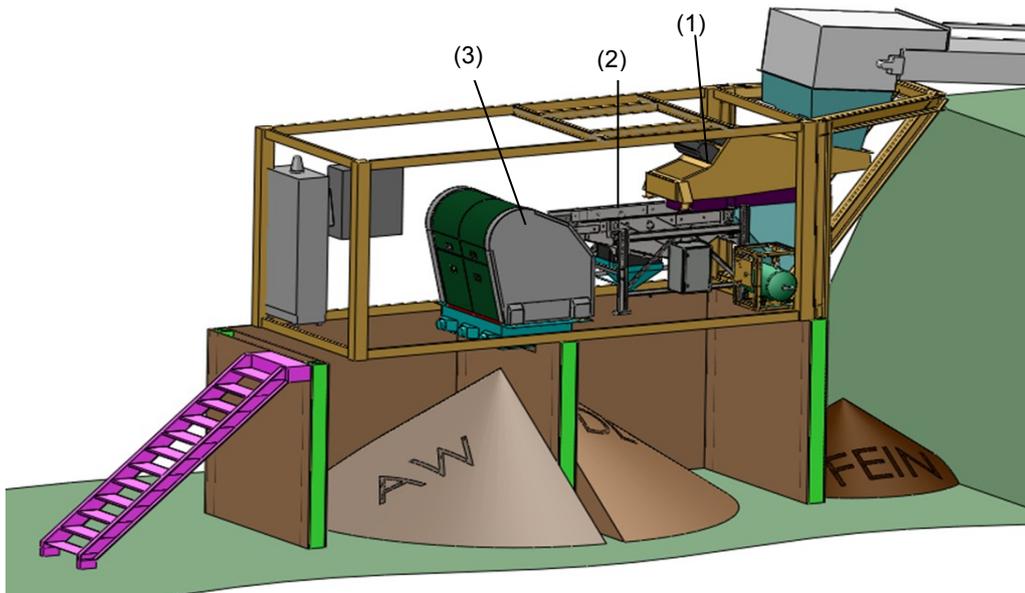


Abbildung 88: Aufstellungsvorschlag für Quarzbruch

Durch die flexible und einfache Parametrierung sowie Umrüstung der eingesetzten Aggregate, können im Batchbetrieb, wie in diesem Fallbeispiel gefordert, unterschiedliche Aufgabequalitäten und Zwischenprodukte sortiert, sowie kundenspezifische Produkte erzeugt werden. Voraussetzung ist eine entsprechende Logistik und Infrastruktur für die Zwischen- sowie Endlagerung der Trennprodukte. Sofern größere Mengen aufzubereiten sind, ist eine kaskadische Anordnung mehrerer Sortiersysteme zielführend. Eine Verschaltungsvariante ist

dazu beispielhaft in Abbildung 89 abgebildet. Anzumerken ist, dass diese Verfahrenslösung mit vergleichsweise signifikant höheren Investitionskosten verbunden ist.

In dem in Abbildung 89 dargestellten Prozess wird das Aufgabegut mit einer Siebmaschine (1) in zwei zu sortierende Kornbereiche und eine Feinfraktion klassiert. Mittels der integrierten Bebrausung wird das Aufgabegut von Haftkorn gereinigt und benetzt. Der Hauptanteil des Bebrausungswassers wird im Siebunterlauf zusammen mit der Feinfraktion ausgetragen. Die Aufgaberinnen (2.1, 2.2) sind mit einem Lochbodeneinsatz ausgerüstet, um das Aufgabegut zusätzlich zu entwässern und die Verschleppung von Wasser sowie Schmutz auf die Rutsche der ersten Sortiermaschinen (3.1, 3.4) zu minimieren. Der eigentliche Sortierprozess ist dreistufig und parallel aufgebaut. Die Sortieraufgaben sind für beide Kornbereiche gleich. In der ersten Sortierstufe werden stark verfärbte Objekte als Bergefraction aussortiert. Aus der Zwischenfraktion werden in der zweiten Sortierstufe (3.2, 3.5) leicht verfärbte und stark verfärbte Objekte aussortiert. Es wird ein Produkt mit der Bezeichnung „Qualität III“ hergestellt. In der dritten Stufe (3.3, 3.6) werden aus der Durchlaufraktion, in welcher die weißen Objekte konzentriert sind, semitransparente weiße Objekte bzw. sehr reiner Quarz aussortiert und ein chemisch überaus reines sowie hochwertiges Produkt mit der Bezeichnung „Qualität I“ erzeugt. Die Durchlaufraktion kann als Produkt mit der Bezeichnung „Qualität II“ verwertet werden.

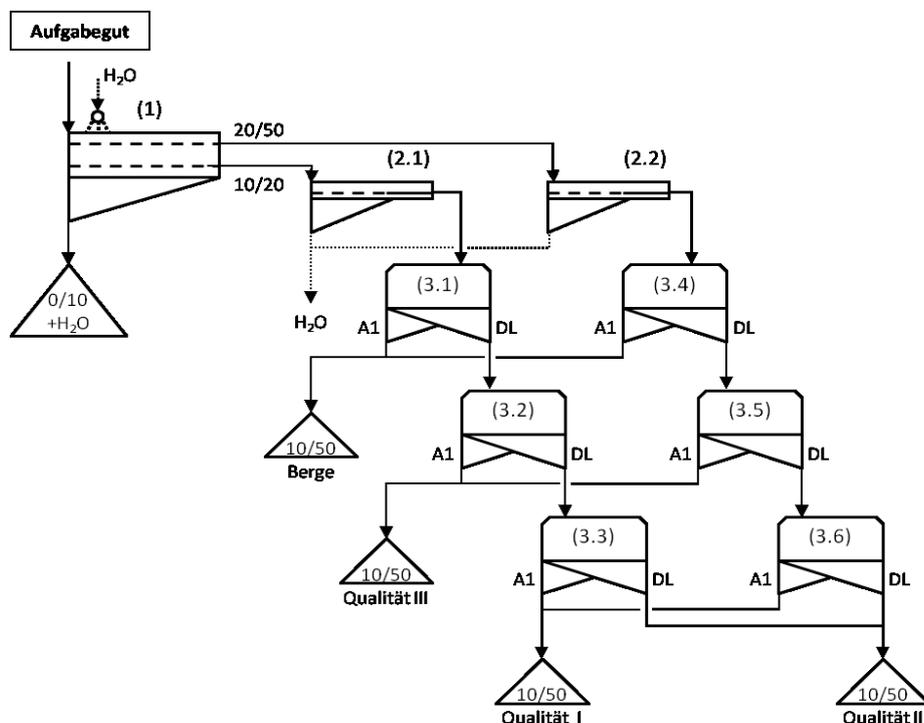


Abbildung 89: Prozessschema - Herstellung unterschiedlicher Qualitäten

6.4.4.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsserie zur Prozesssimulation nach Abbildung 89 wurde auf einem MINEXX VIS-Testsystem mit der unter 6.4.4.2 beschriebenen LED-Beleuchtungstechnik im Technikum der Binder+Co AG durchgeführt. Das Probenmaterial wurde trocken klassiert. Die Kornfraktionen 10/20 mm und 20/50 mm wurden händisch mit Wasser benetzt und sortiert. In dieser Arbeit wird zur Wahrung der Übersichtlichkeit nur auf die 3-stufige Versuchskampagne der Fraktion 10/20 mm zur Simulation der Position 3.1, 3.2 und 3.3 aus Abbildung 89 eingegangen. Die Farb- und Transmissionsklassengrenzen wurden anhand von benetzten Mustern definiert und darauf basierend eine geeignete Klassifikationstabelle in Abstimmungen mit dem Interessenten erstellt. Das Testsystem wurde entsprechend der jeweiligen Sortieraufgabe parametrier²⁵. Als Trennkriterium für die erste und zweite Sortierstufe dient nur die Oberflächenfarbe nach der Klassenzuordnung entsprechend MK1 bis MK5. Hingegen wird auf der dritten Stufe auch die Transmission als Kriterium einbezogen und eine bewusste Trennung der Mineralphasen Quarz und Feldspat (MK6) vorgenommen. Die Analyse der Versuchschargen erfolgte mittels Handklaubung.

Auf Basis der Einzelversuche wurden großtechnische Versuche mit einem Testaufbau entsprechend der Anordnung und Ausführung aus Abbildung 88 durchgeführt. Photographische Abbildungen des Bebrausungssiebes und der Aufgaberinne sind in Abbildung 90 dargestellt.

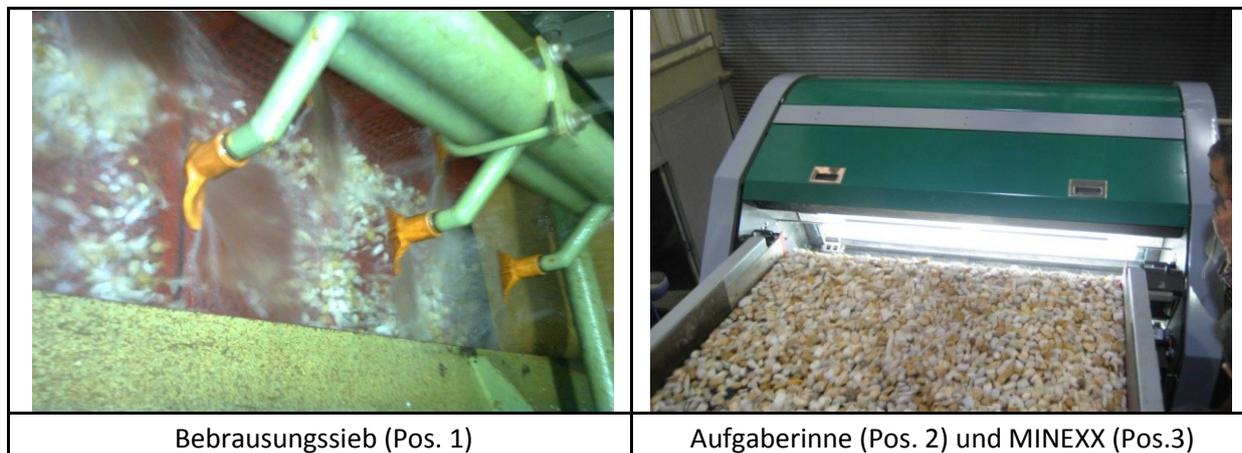


Abbildung 90: Großversuch zu Applikation 014/2010

6.4.4.5 Ergebnisse

Aus den Versuchsergebnissen zu Pos.3.1 (Tabelle 33) ergibt sich eine Konzentration von MK4 und MK5 in der Bergefraktion (A1-3.1) von 88,8 %. Diese hohe Konzentration ist auch optisch

²⁵ MMI-SW: V 1.9.1.2, Sortierrechner-SW: V 1.4.8

gut erkennbar. Wesentliche Aufgabenstellung war die Erzielung möglichst hoher Inhaltsausbringenswerte für MK1, MK2 und MK3 in die Zwischenfraktion (3.1-DL) und das konnte mit 98,73 % sehr gut erfüllt werden.

| Aufgabe: Quarz 10/20 mm | | | |
|-------------------------|--------------|---------------|-----------------|
| | M [g] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1; MK2; MK3 | 38079 | 87,42 | |
| MK4; MK5 | 5482 | 12,58 | |
| Summe | 43561 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | -- | [sec] |
|-------------------------|-----------------------|----|--------|
| 3.1-A1: MK4; MK5 | Kapazität auf 480mm: | -- | [t/h]. |
| | Kapazität auf 1000mm: | -- | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------|-------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1; MK2; MK3 | 485 | 11,20 | | 1,27 | 37594 | 95,83 | | 98,73 |
| MK4; MK5 | 3846 | 88,80 | | 70,16 | 1636 | 4,17 | | 29,84 |
| Summe | 4331 | 100,00 | | | 39230 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 9,94 | | | | 90,06 | | | |




Tabelle 33: Versuchsergebnis zu Pos. 3.1

| Aufgabe: Durchlauf 3.1, Quarz 10/20 mm | | | |
|--|----------------|---------------|-----------------|
| | M [g] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1; MK3 | 26022 | 67,17 | |
| MK2, MK4, MK5 | 12718,5 | 32,83 | |
| Summe | 38740,5 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | -- | [sec] |
|--------------------------------|-----------------------|----|--------|
| 3.2 – A1: MK2, MK4, MK5 | Kapazität auf 480mm: | -- | [t/h]. |
| | Kapazität auf 1000mm: | -- | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------|--------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1; MK3 | 1997 | 15,32 | | 7,67 | 24025 | 93,47 | | 92,33 |
| MK2, MK4, MK5 | 11039 | 84,68 | | 86,79 | 1679,5 | 6,53 | | 13,21 |
| Summe | 13036 | 100,00 | | | 25704,5 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 33,65 | | | | 66,35 | | | |

Tabelle 34: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.2

Aus der Zwischenfraktion wurden in der zweiten Sortierstufe (3.2, Tabelle 34) leicht verfärbte (MK2) und in der ersten Stufe nicht abgetrennte, stark verfärbte (MK4, MK5) Objekte aktiv

aussortiert. Die chemische Zusammensetzung der Auswurffraktion (A1-3.2, „Qualität III“) weist darauf hin, dass diese beispielsweise für den Einsatz in der Grünglaserstellung geeignet ist. Wiederum ist das Inhaltsausbringen der hochwertigen Merkmalsklassenobjekte mit 92,33 % sehr gut.

In der dritten Stufe (3.5, Tabelle 35) wurden aus der Durchlaufraktion, in welcher die weißen Objekte nun konzentriert sind, semitransparente weiße Objekte bzw. reiner Quarz (MK1) aussortiert. Ein chemisch sehr reines hochwertiges Produkt (A1-3.3, „Qualität I“) wurde erzeugt. Nichttransparente weiße Objekte bzw. Feldspat (MK6) und in den vorgelagerten Stufen nicht abgetrennte verfärbte Objekte reichern sich mit einem Gehalt von 84,91 % im Durchlauf an (A1-3.2, „Qualität II“).

| Aufgabe: Durchlauf 3.2, Quarz 10/20 mm | | | |
|--|-------|---------------|-----------------|
| | M [g] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1 | 14316 | 56,81 | |
| MK2-MK6 | 10884 | 43,19 | |
| Summe | | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | -- | [sec] |
|------------------|-----------------------|----|--------|
| 3.3 – A1: MK1 | Kapazität auf 480mm: | -- | [t/h]. |
| | Kapazität auf 1000mm: | -- | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------|-------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1 | 12566 | 92,38 | | 87,78 | 1750 | 15,09 | | 12,22 |
| MK2-MK6 | 1037 | 7,62 | | 9,53 | 9847 | 84,91 | | 90,47 |
| Summe | 13603 | 100,00 | | | 11597 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 53,98 | | | | 46,02 | | | |




Tabelle 35: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.5

Eine Gesamtbilanzierung ist mangels einer durchgängigen Gehaltsanalyse der einzelnen Merkmalsklassen nicht möglich.

6.4.5 Magnesitbruch

Magnesit (MgCO_3) wird vor allem zur Herstellung von hochfeuerfesten Baustoffen, welche beispielsweise zum Auskleiden von Sauerstoff-Konvertern (LD-Verfahren), Elektroöfen für die Stahlerzeugung oder allgemein als Isoliermaterial dienen, eingesetzt. Die Gewinnung des Metalls Mg erfolgt derzeit nur untergeordnet aus Magnesit, vorwiegend aber aus Rückständen der K-Mg-Salz-Verarbeitung oder direkt aus dem Meerwasser. Magnesit kommt vorwiegend als sogenannter *Spat-* oder *Kristallmagnesit* oder in dichten, mikrokristallinen Aggregaten als sogenannter *Gelmagnesit* vor. Als Spatmagnesit kommt er im räumlichen Verband mit Dolomitgesteinen oder dolomitischem Kalkstein beispielsweise in Österreich und als Gelmagnesit in Einschaltungen in Serpentinegesteinen als deren Zersetzungsprodukt vor (88).

6.4.5.1 Sortiergut und Zielsetzungen

Beim Roh- bzw. Aufgabegut des gegenständlichen Fallbeispiels Magnesit-32/2012 handelt es sich um hochwertigen Gelmagnesit aus der Türkei mit Serpentin als wesentliches Begleitmineral sowie auch anderen Mineralphasen von mengenmäßig untergeordneter Bedeutung. Das Rohgut wird zumeist, wie in Abbildung 91/links dargestellt, selektiv in verschiedenen Lagerstätten abgebaut.

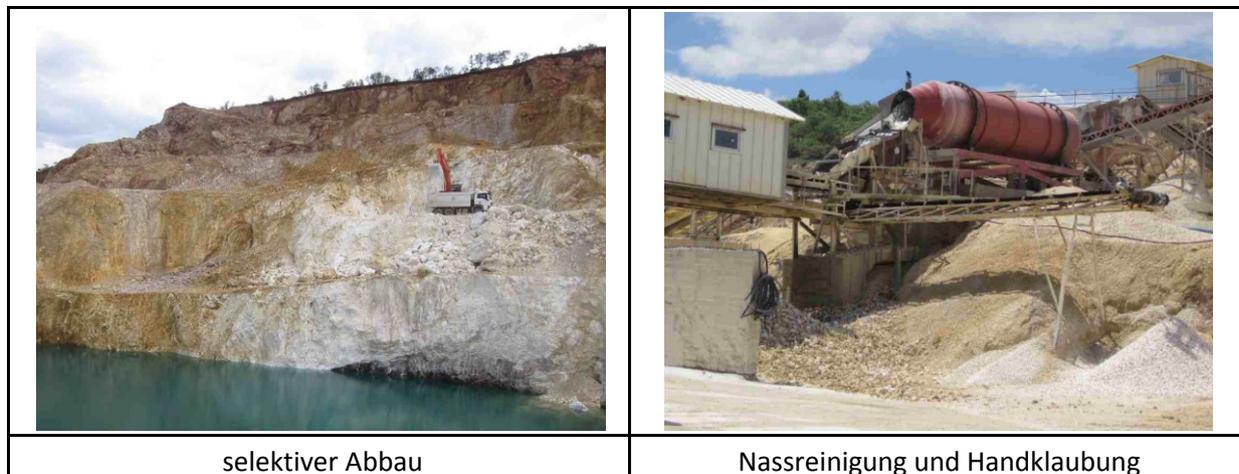


Abbildung 91: Traditioneller Abbau und Aufbereitung von Magnesit in der Türkei

Traditionell wird, wie in Abbildung 92/rechts dargestellt, nach einer Nassreinigung mittels Handklaubung und/oder Starkfeld-Magnetscheidung das Wertmineral aufkonzentriert. Eine beispielhafte traditionelle Magnesit-Handklaubung ist auch in Abbildung 5 am Beginn dieser Arbeit dargestellt. Die für die Handklaubung wenig bzw. nicht geeignete Körnung 8/50 mm soll künftig mittels VIS-basierter Sortierung aufbereitet werden. Priorität hat dabei die Abtrennung von Serpentin. Zudem soll in einer erweiterten Machbarkeitsstudie die Möglichkeit geprüft werden, Fraktionen hoher chemischer Reinheit herzustellen. Bis zu 15 Qualitätsklassen

werden durch eine Gehaltmatrix von SiO_2 (0,0 - 2,75%), Fe_2O_3 (0,15 – 0,75%) und CaO (0,5 – 3,50%) festgelegt. Die Einsatzmöglichkeiten bzw. Preise variieren innerhalb der gültigen Qualitäts- bzw. Gehaltmatrix erheblich.

In Abstimmung mit dem Aufbereiter und seinem Endkunden wurden die in Tabelle 36 angeführten Merkmalsklassen definiert. Die Muster sind entsprechend des vorgelagerten Konditionierungsprozesses mit Wasser benetzt abgebildet.

| | | |
|---|--|---|
|  |  |  |
| MK1: Magnesit (MgCO_3) - weiß | MK2: Magnesit - hellgelb | MK3: Magnesit - knollig, oberflächlich verwachsen |
|  |  |  |
| MK4: Verwachsungen von Magnesit mit MK5 bis MK7 – alle Farben | MK5a: Calcit (CaCO_3) – vorwiegend knollig, weiß, leicht gefärbt | MK5b: Dolomit ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$) – weiß, hellgelb |
|  |  | |
| MK6: Chalzedon (SiO_2)– weiß, leicht gefärbt | MK7: Serpentin bzw. Serpentin ($\text{Mg}_6 [(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}]$) – intensiv gefärbt (braun, schwarz, ...) | |

Tabelle 36: Merkmalsklassendefinition Magnesit - 32/2013

Weißer Magnesitbruch (MK1) repräsentiert die höchste Qualitätsstufe. Im Kristallgitter eingebautes Fe (MK2), oberflächliche Verunreinigungen (MK3) und Verwachsungen (MK4) repräsentieren mindere Qualitätsklassen. Neben Serpentin (MK7) kommen Calcit (MK5a),

Dolomit (MK5b) und Chalzedon (MK6) in geringen Mengen als Begleitminerale im Rohgut bzw. Sortiergut vor.

Als Teil der umfangreichen Machbarkeitsuntersuchungen wurden Gehaltsanalysen unterschiedlicher anfallender Aufgabefractionen vor Ort durchgeführt. Die Aufgabegutzusammensetzung von mehr als einem Dutzend analysierter Fraktionen schwankt je nach Abbauort und Vorsortierung stark. Für selektiv abgebautes Rohgut kann der Magnesitgehalt (MK1, MK2 und MK3) über 95 % betragen. Sogenanntes „Haldenmaterial“ weist hingegen nur mehr einen Magnesitgehalt von ca. 30 % oder weniger auf. Im Gegenzug steigt im Wesentlichen der Serpentinithalt über 60 %. Der Anteil an Verwachsungsobjekten (MK4) liegt in der Regel bei 10 bis 20 %. Der Anteil an Calcit (MK5a), Dolomit (MK5b) und Chalzedon (MK6) liegt bei wenigen Prozentpunkten. In Tabelle 37 sind beispielhaft chemische Gehaltsanalysen der qualitätsbestimmenden Oxide dargestellt. Grün markiert sind die Minimumwerte und rot markiert die Maximalwerte, welche die Gehaltsbandbreiten wiedergeben.

| Probe | 1 | | 2 | | 4 | | 5 | 6 | | 7 | |
|------------------------------------|------|---------|--------|---------|-------|---------|--------|-------|---------|-------|---------|
| Kornklasse [mm] | 8-20 | 20 - 50 | 8 - 15 | 15 - 45 | 8 -15 | 15 - 45 | 8 - 22 | 8 -15 | 15 - 45 | 8 -15 | 15 - 45 |
| SiO ₂ [%] | 9,53 | 7,14 | 3,24 | 1,43 | 7,74 | 5,41 | 1,79 | 8,11 | 9,47 | 6,29 | 4,50 |
| Fe ₂ O ₃ [%] | 1,67 | 1,31 | 0,58 | 0,26 | 1,34 | 1,03 | 0,80 | 1,76 | 1,37 | 1,69 | 1,28 |
| CaO [%] | 1,53 | 1,21 | 2,71 | 3,55 | 4,10 | 4,06 | 1,09 | 6,96 | 11,90 | 3,20 | 2,25 |

Tabelle 37: Ergebnisse chemischer Gehaltsanalysen diverser Aufgabegutproben

6.4.5.2 Optische Eigenschaften und Detektionstechnik

Bereits die erfahrungsbasierte visuelle Analyse legt nahe, dass die Oberflächenfarbdetektion nur bedingt effizient sein kann. Dies wird auch durch die technische Analyse der optischen Eigenschaften bestätigt. Zur Diskussion sind in Tabelle 38 und Tabelle 39 Systemaufnahmen, Klassifikationsergebnisse²⁶ und RGB-Intensitätsprofile repräsentativer Muster dargestellt. Da einerseits sehr weiße und andererseits auch dunkle bzw. schwarze Objekte vorkommen, wurde für eine möglichst gute Objekterkennung ein blauer Hintergrund gewählt. Die Intensität der Beleuchtung und Detektorkalibrierung wurden derart gewählt, dass weiße bzw. sehr helle Bereiche gesättigt abgebildet werden. Dadurch wird der Dynamikbereich des Detektors bestmöglich für die Unterscheidung von Farbnuancen bei geringerer Intensität genützt.

²⁶ Farbenzuordnung: MK1...grün, MK2...gelb, MK3...rot, MK7...braun, Unbekannt...violett und Hintergrund...weiß

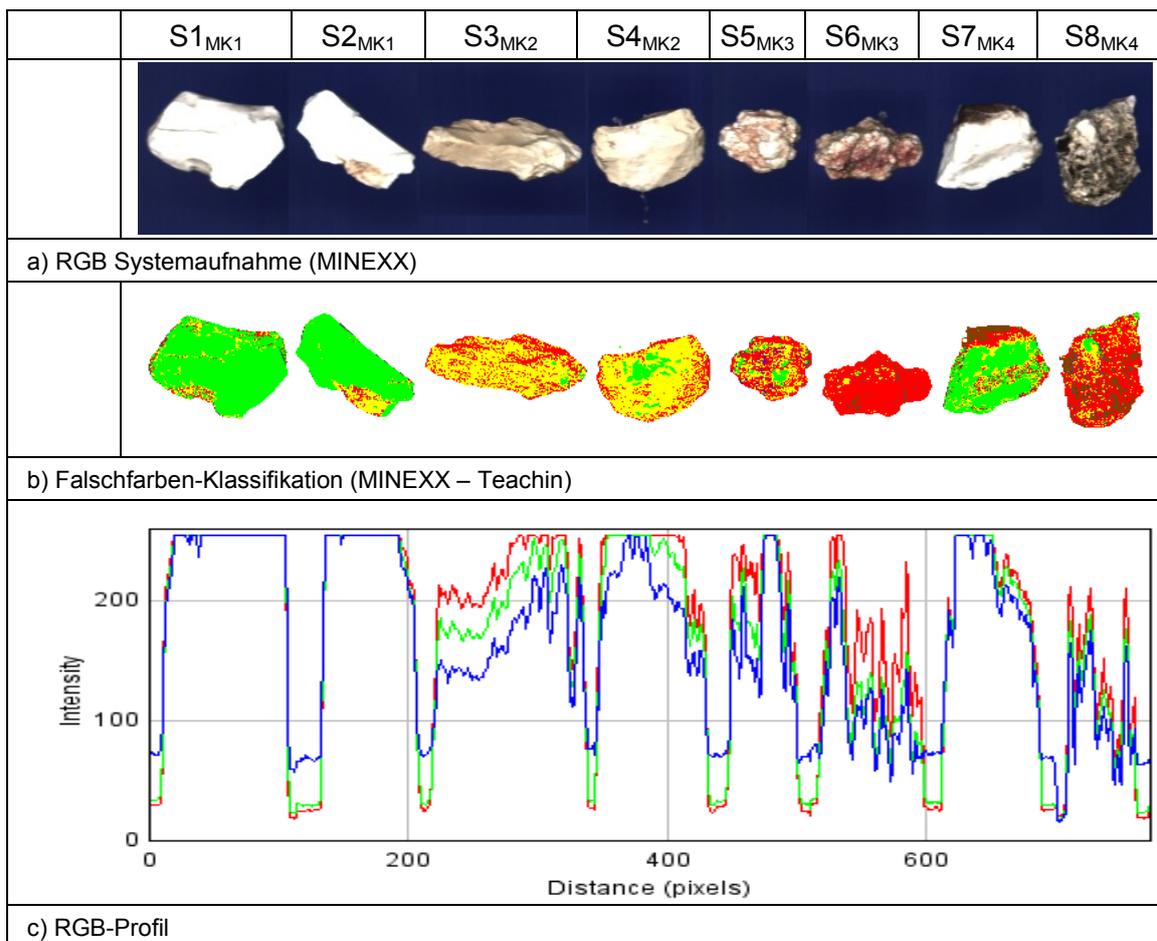


Tabelle 38: Klassifikationsvergleich Teil 1 - Magnesitklassen (MK1, MK2, MK3) und Verwachsungsklasse (MK4)

Der intensiv gefärbte Serpentin (S14, S15) kann eindeutig als störendes Begleitmineral von weißem oder leicht gefärbtem Magnesit (S1 bis S6) unterschieden werden. Als schwierig gestaltet sich jedoch die farbliche Abgrenzung zu den auch ähnlich gefärbten Begleitmineralphasen Calcit (S9, S10), Dolomit (S11), und Chalzedon (S12, S13). Farblich überschneiden sich dieser insbesondere mit dem knollenförmigen Magnesit, der im Inneren weiß und nur oberflächlich verkrustet bzw. inhomogen verfärbt ist. Der oberflächliche Verfärbungsgrad kann zudem stark schwanken und dies bildet sich auch in der Dynamik des RGB-Profiles (S5, S6) ab. Dolomit und Chalzedon kommen auch als weiße Varietäten (S11, S13) vor und überschneiden sich farblich auch mit dem weißen Magnesit (S1, S2). Die Korrelationsbedingung nach Kapitel 6.2 ist in diesem Fallbeispiel nur teilweise erfüllt. Eine wasserbenetzte Oberfläche ist auch in diesem Fallbeispiel für die Kontrastverstärkung und Detektion der Oberflächenfarbe von Vorteil.

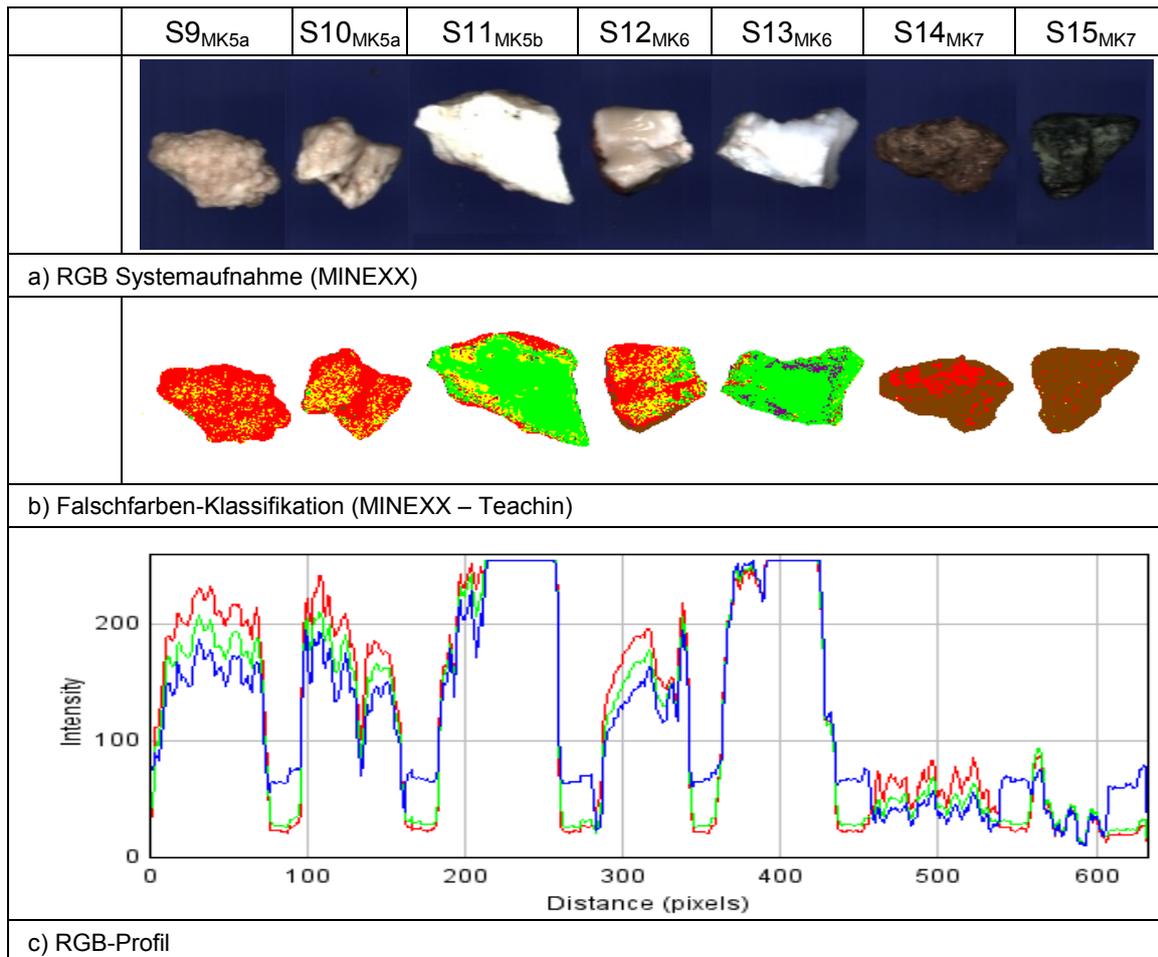


Tabelle 39: Klassifikationsvergleich Teil 2 - störender Mineralphasen (MK5, MK6, MK7)

6.4.5.3 Konditionierung und Sortierprozess

Die Konditionierungsanforderungen sind wiederum ähnlich denen in 6.4.2.3 für Quarzkies beschrieben. Die kritische untere Korngrößengrenze für Rutschensortierer liegt für dieses kantige und überwiegend ebenflächige Sortiergut bei ca. 6 mm. Da der Anteil an Verwachsungsobjekten (MK4) in allen analysierten Rohgutfractionen gering ist, ist eine zweiseitige Detektion nicht erforderlich. Die unterschiedliche Rohgutzusammensetzung und komplexe Qualitätsmatrix führen zu einer Vielzahl an möglichen Verschaltungsvarianten. In Abbildung 92 ist dazu beispielsweise einer der konzipierten und simulierten mehrstufigen Sortierprozesse dargestellt.

Die Siebmaschine (1) ist mit einer Bebrausung ausgeführt und klassiert das Aufgabegut in zwei Sortierfraktionen und eine Feinfraktion. Damit erfolgt eine Reinigung und Entwässerung der beiden Sortierfraktionen. Die Aufgaberinnen (2.1, 2.2) sind idealerweise wieder mit einem Lochbodeneinsatz ausgerüstet. In der ersten Sortierstufe (3.1 und 3.3) wird aus beiden Sortierfraktionen der Serpentin aktiv abgetrennt. Dies entspricht einer klassischen Bergevorabscheidung (Rougher). In der zweiten Stufe (3.2, 3.4) erfolgt eine Nachreinigung

(Cleaner). Aus der Kornfraktion 8/20 mm soll optional auf einer dritten Stufe (3.5) eine qualitativ höherwertige Magnesitfraktion (Qualität I) aktiv gewonnen werden.

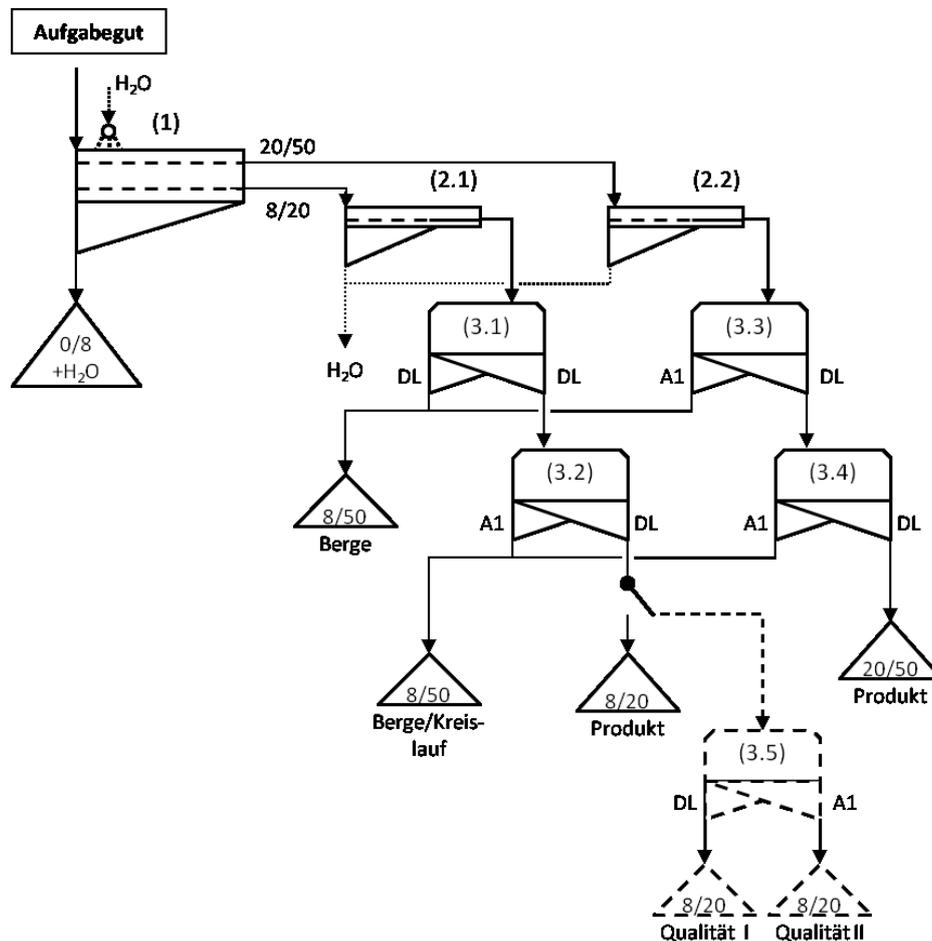


Abbildung 92: Prozessschema – Magnesit

6.4.5.4 Versuchsdurchführung

Die Prozesssimulation nach Abbildung 92 und ähnlichen Verschaltungen wurde im Rahmen einer großen Versuchsreihe mit über einem Dutzend unterschiedlicher Aufgabegutmuster auf einem MINEXX VIS-Testsystem im Technikum der Fa. Binder+Co AG und vor Ort in der Türkei durchgeführt. Das Probenmaterial wurde klassiert und gewaschen beige stellt. Die Kornfraktionen 8/20 mm und 20/50 mm wurden sortiert. Die Farb- bzw. Merkmalsklassen wurden anhand von benetzten Mustern definiert und darauf basierend eine geeignete Klassifikationstabelle in Abstimmungen mit dem Interessenten erstellt. Das Testsystem wurde entsprechend der jeweiligen Sortieraufgabe parametrier²⁷.

²⁷ MMI-SW: V 1.9.1.2, Sortierrechner-SW: V 1.4.8

6.4.5.5 Ergebnisse

Exemplarisch sind Versuchsergebnisse einer Simulation entsprechend Abbildung 92 mit einem qualitativ schlechten und sortiertechnisch anspruchsvollen Aufgabegutmuster bzw. Haldenmaterial dargestellt.

Wie aus Tabelle 40 (Pos. 3.1) und Tabelle 41 (Pos. 3.3) ersichtlich ist, beträgt der Berge- bzw. Serpentinanteil (MK7) in den Aufgabegutfraktionen ca. 25 %. Für die Simulation wurde das Testsystem derart parametrieren, dass ein hohes aktives Inhaltsausbringen der intensiv gefärbten Serpentinobjekte bei geringem Wertstoffverlust (MK1, MK2, MK3) erzielt wird. Aus den Versuchsergebnissen ergeben sich sehr gute und etwa gleiche Trenngrade von ca. 87 % für beide Kornklassen und eine hohe Merkmalsklassenkonzentration in den Trennfraktionen. Dies ist auch gut aus der Fotodokumentation ersichtlich. Insbesondere in der Wertstoffzwischenfraktion (DL-3.1 und DL-3.3) konnte der Serpentinanteil auf 1,97 % und 3,13 % reduziert werden. Das vergleichsweise geringere Inhaltsausbringen mit 90,38 % von Serpentin in der Grobfraktion ist auf die Objektgröße bzw. das höhere Objektgewicht und die damit verbundene effektorische Restriktionen zurückzuführen.

| Aufgabe: Magnesitbruch, 8/20 mm | | | |
|---------------------------------|--------|---------------|-----------------|
| | M [kg] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1-MK6 | 212,8 | 71,57 | |
| MK7 | 84,5 | 28,43 | |
| Summe | 297,3 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | 225 | [sec] |
|------------------|-----------------------|------|--------|
| 3.1-A1: MK7 | Kapazität auf 400mm: | 4,75 | [t/h]. |
| | Kapazität auf 1000mm: | 11,9 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------|--------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [kg] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [kg] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1-MK6 | 17,2 | 17,60 | | 8,09 | 195,6 | 98,03 | | 91,91 |
| MK7 | 80,6 | 82,40 | | 95,36 | 3,9 | 1,97 | | 4,64 |
| Summe | 97,8 | 100,00 | | | 199,5 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 32,90 | | | | 67,10 | | | |




Tabelle 40: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.1, Fraktion 8/20 mm

| Aufgabe: Magnesitbruch, 20/50 mm | | | |
|----------------------------------|--------------|---------------|-----------------|
| | M [kg] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1-MK6 | 205,2 | 75,50 | |
| MK7 | 66,6 | 24,50 | |
| Summe | 271,8 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | 136 | [sec] |
|--------------------|-----------------------|------|--------|
| 3.3-A1: MK7 | Kapazität auf 400mm: | 7,17 | [t/h]. |
| | Kapazität auf 1000mm: | 17,9 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------|--------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [kg] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [kg] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1-MK6 | 6,6 | 9,91 | | 3,22 | 198,6 | 96,88 | | 96,78 |
| MK7 | 60,2 | 90,09 | | 90,38 | 6,4 | 3,13 | | 9,62 |
| Summe | 66,8 | 100,00 | | | 205,0 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 24,58 | | | | 75,42 | | | |

Tabelle 41: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.3, Fraktion 20/50 mm

Die beiden Wertstoffzwischenfraktionen DL-3.1 und DL-3.3 wurden in der zweiten Sortierstufe (Pos. 3.2, Pos. 3.5) nachgereinigt. Das Testsystem wurde dazu derart parametrierd, dass neben den, in der ersten Stufe nicht aussortierten, Serpentinobjekten nun auch Verwachsungsobjekte (MK4) aktiv abgetrennt werden. Die Versuchsergebnisse sind dazu in Tabelle 42 und Tabelle 43 dargestellt.

| Aufgabe: 3.1 – DL, 8/20 mm | | | |
|------------------------------|--------------|---------------|-----------------|
| | M [kg] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1,MK2, MK3, MK5, MK6 | 171,6 | 88,26 | |
| MK4, MK7 | 22,8 | 11,74 | |
| Summe | 194,4 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | 145 | [sec] |
|------------------------|-----------------------|-------|--------|
| 3.2-A1: MK4+MK7 | Kapazität auf 400mm: | 4,8 | [t/h]. |
| | Kapazität auf 1000mm: | 12,04 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|------------------------------|--------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [kg] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [kg] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1,MK2, MK3, MK5, MK6 | 13,5 | 42,99 | | 7,89 | 158,0 | 97,01 | | 92,11 |
| MK4, MK7 | 18,0 | 57,01 | | 78,68 | 4,9 | 2,99 | | 21,32 |
| Summe | 31,5 | 100,00 | | | 162,9 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 16,20 | | | | 83,80 | | | |




Tabelle 42: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.2, Fraktion 8/20 mm

Der aus den Daten ableitbare Trennungsgrad für die Kornklasse 8/20 mm ist mit ca. 71 % etwas geringer als für die Kornklasse 20/50 mm mit 78 %. Die Produkte (DL-3.2 und DL-3.4)

beinhaltet nahezu keine massiven Serpentinobjekte und auch der Gehalt an Verwachsungsobjekten ist mit 2,99 % und 2,1 % sehr gering. Die Auswurffractionen enthalten gemittelt ca. 40 % hell gefärbte Objekte, von denen ein hoher Anteil den Magnesitklassen MK1 bis MK3 zuzuordnen ist. Diese Fraktionen könnten über eine Rückgewinnungsstufe (Scavenger) mit entsprechend selektiver Parametrierung aufbereitet und Magnesit rückgewonnen werden.

| Aufgabe: 3.4-DL, 20/50 mm | | | |
|---------------------------|--------|----------------------|------------------------|
| | M [kg] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| MK1, MK2, MK3, MK5, MK6 | 178,7 | 88,29 | |
| MK4, MK7 | 23,7 | 11,71 | |
| Summe | 202,4 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | 123 | [sec] |
|------------------|-----------------------|------|-------|
| 3.4-A1: MK7 | Kapazität auf 400mm: | 6,3 | [t/h] |
| | Kapazität auf 1000mm: | 15,8 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|-------------------------|--------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [kg] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [kg] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| MK1, MK2, MK3, MK5, MK6 | 12,0 | 37,35 | | 6,71 | 166,7 | 97,90 | | 93,29 |
| MK4, MK7 | 20,1 | 62,65 | | 84,87 | 3,6 | 2,10 | | 15,13 |
| Summe | 32,1 | 100,00 | | | 170,3 | 100,00 | | |
| r _{m,j} [%] | 15,86 | | | | 84,14 | | | |

Tabelle 43: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.4, Fraktion 20/50 mm

In Tabelle 44 sind ergänzend zu den Merkmalsklassenanalysen chemische Analysen der Aufgabefractionen, Zwischen- und Endprodukte dargestellt. Insbesondere der SiO₂- und Fe₂O₃-Gehalt konnte bereits mit der ersten Sortierstufe (Rougher) durch Abtrennung der intensiv gefärbten Serpentinobjekte deutlich reduziert werden. Die Gehalte aller relevanten Stoffe liegen bereits innerhalb der erforderlichen Qualitätsgrenzwerte. Mittels Nachreinigungsstufe (Cleaner) erfolgte eine weitere Qualitätsverbesserung, welche aber deutlich geringer ausfiel.

| chem. Verbindungen | Qualitätsbereiche | Aufgabe-3.1 8-20mm | DL-3.1 (Rougher) | DL-3.2 (Cleaner) | Aufgabe-3.3 20-50 mm | DL-3.3 (Rougher) | DL-3.4 (Cleaner) |
|------------------------------------|-------------------|--------------------|------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------|
| SiO ₂ [%] | 0,0 – 2,75 | 9,57 | 1,81 | 1,12 | 7,14 | 1,95 | 1,08 |
| Fe ₂ O ₃ [%] | 0,15 – 0,75 | 1,67 | 0,28 | 0,14 | 1,31 | 0,37 | 0,18 |
| CaO [%] | 0,5 – 3,50 | 1,53 | 1,28 | 1,03 | 1,21 | 1,22 | 0,93 |

Tabelle 44: Ergebnisse der chemischen Gehaltsanalysen der Aufgabefraction, Zwischen- und Endprodukte zu Pos. 3.1 bis 3.4

Die in den Zwischen- und Endprodukten ausgewiesenen SiO₂- und CaO-Gehalte werden vor allem durch Chalzedon, Calcit und Dolomit verursacht. Nur mittels Aussortierung dieser

überwiegend hellfarbigen Mineralphasen (MK5, MK6) wäre eine weitere signifikante Qualitätsverbesserung möglich.

Mit einem ähnlich zusammengesetzten Material aus einer anderen Versuchsserie wurden dazu spezifische Versuche zur Simulation einer weiteren Reinigungsstufe - entsprechend der Pos. 3.5 in Abbildung 92 – durchgeführt. Die Aufgabenstellung dazu war ein hochwertigeres Magnesitprodukt (Qualität I) herzustellen. Das Inhaltsausbringen von weißem, leicht und partiell gefärbtem Magnesit (MK1) sollte dabei möglichst hoch sein. Es wurden zur Optimierung der Parametereinstellungen mehrere Tastversuche durchgeführt. Die Ergebnisse eines repräsentativen Versuchs sind dazu in Tabelle 45 dargestellt.

| Aufgabe: Vorsortierter Magnesitbruch – DL, 8/20 mm | | | |
|--|--------|---------------|-----------------|
| | M [kg] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1 | 212,8 | 64,69 | |
| MK2, MK3 | 95,1 | 28,91 | |
| MK4, MK7 | 5,8 | 1,76 | |
| MK5, MK6 | 15,2 | 4,64 | |
| Summe | 328,9 | 100,00 | |

| | | | |
|------------------|-----------------------|------|--------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | 290 | [sec] |
| 3.5-DL: MK1 | Kapazität auf 480mm: | 4,1 | [t/h]. |
| | Kapazität auf 1000mm: | 10,2 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------|--------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [kg] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [kg] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1 | 6,8 | 8,44 | | 3,21 | 205,9 | 83,03 | | 96,79 |
| MK2, MK3 | 62,0 | 76,68 | | 65,21 | 33,1 | 13,34 | | 34,79 |
| MK4, MK7 | 4,9 | 6,06 | | 84,48 | 0,9 | 0,36 | | 15,52 |
| MK5, MK6 | 7,1 | 8,82 | | 46,79 | 8,1 | 3,27 | | 53,21 |
| Summe | 80,8 | 100,00 | | | 248,0 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 24,58 | | | | 75,42 | | | |

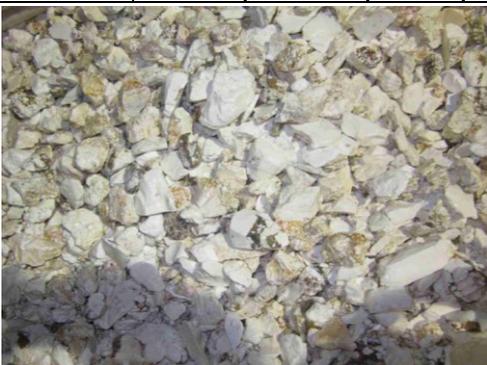



Tabelle 45: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.5, Fraktion 8/20 mm

In der Auswurffraktion (A1-3.5) konzentrieren sich im Wesentlichen verfärbte Objekte, insbesondere zumeist großflächig verfärbte knollenförmige Magnesitobjekte (MK3). Da auch

weißer Magnesit (MK1) mit geringen partiellen Fremdmineralverwachsungen bzw. Verfärbungen über die Pixel-Gewichtung dem hochwertigen Magnesitprodukt zugeordnet wurden, ist das Inhaltsausbringen mit 96,79 % wie angestrebt hoch. In der Durchlaufraktion (DL-3.5) konzentrieren sich entsprechend weiße und wenig verfärbte Objekte. Das Inhaltsausbringen bzw. der Abscheidegrad der störenden Mineralphasen MK5 und MK6 ist allerdings mit 46,79 % sehr gering und die Übersortierung der Magnesitklassen MK2 und MK3 mit 65,21 % enorm hoch. Es würde sich in diesem Fall sogar ein negativer Trenngrad ergeben!

In Tabelle 46 sind ergänzend zu den Merkmalsklassenanalysen chemische Analysen der Aufgabefraktion und der Trennprodukte dargestellt. Der geringe Abscheidegrad bezüglich MK5 und MK6 führt nicht wie angestrebt zu einer signifikanten Qualitätssteigerung des hochwertigen Magnesitprodukts (DL-3.5). Insbesondere ist der CaO-Gehalt sehr hoch und liegt sogar für beide Trennprodukte über dem Qualitätsgrenzwert. Dies ist auch auf einen hohen abbaubedingten Calcit-Anteil im Roh- bzw. Aufgabegut zurückzuführen.

| chem. Verbindungen | Qualitätsbereiche | Aufgabe-3.3 8-20mm | AW-3.5 (Cleaner) | DL-3.5 (Cleaner) |
|------------------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| SiO ₂ [%] | 0,0 – 2,75 | 1,20 | 1,51 | 1,05 |
| Fe ₂ O ₃ [%] | 0,15 – 0,75 | 0,17 | 0,23 | 0,14 |
| CaO [%] | 0,5 – 3,50 | 5,18 | 6,74 | 5,13 |

Tabelle 46: Ergebnisse der chemischen Gehaltsanalysen der Aufgabefraktion und Trennprodukte zu Pos. 3.5; Fraktion 8/20 mm

Wie bereits bei der Erörterung der optischen Eigenschaften unter 6.4.5.2 angemerkt, erfüllt das Aufgabegut nur teilweise die Voraussetzungen für eine effiziente farb- bzw. VIS-basiert Sortierung. Die Einsatzgrenzen werden durch die Versuchsergebnisse aufgezeigt. Eine Abtrennung der störenden farbähnlichen Mineralphasen ist VIS-basiert nicht bzw. begrenzt mit Wertmineralverlusten möglich.

6.4.6 Steinsalz

6.4.6.1 Sortiergut und Zielsetzungen

Bei diesem Fallbeispiel mit der internen Datenbanknummer Salz-22/2012 handelt es sich um Steinsalz bzw. Halit (NaCl), welches mit Anhydrit (CaSO_4) und Tonmineralen verunreinigt ist. In Abbildung 93 sind dazu zwei Handstücke abgebildet. Das Steinsalz ist hoch transparent, nahezu farblos und leicht wasserlöslich. Der Anhydrit und die Tonminerale sind opak bzw. nicht transparent, dunkelgrau und schwer bzw. nicht wasserlöslich.

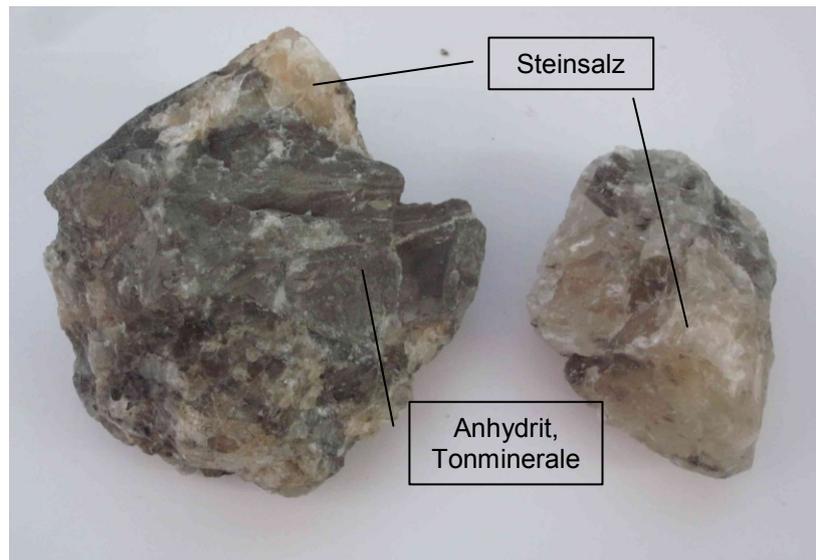


Abbildung 93: Steinsalz/Anhydrit-Verwachsungen

Durch einen bereits eingesetzten Brech- und Siebprozess erfolgt mittels selektiver Zerkleinerung eine Anreicherung von Steinsalz im Zwischenprodukt bzw. Sortiergut. Die Kornfraktion 5/20 mm soll mittels optischer Sortierung von einem NaCl -Gehalt ca. 92 % auf > 97 % Gehalt an NaCl bzw. lösliche Stoffanteile angereichert werden. Maximal 20 % der Aufgabemenge dürfen dabei als Bergefraktion anfallen. In Abstimmung mit dem Aufbereiter wurden die, in Tabelle 47 angeführten, visuellen bzw. indirekten Merkmalsklassen entsprechend dem dreidimensionalen Verwachsungseindruck festgelegt.

Die Kopplung des NaCl -Gehaltes mit der Limitierung der Auswurfmenge erfordert eine Analyse der Merkmalsklassenverteilung und Bestimmung der korrelierenden NaCl -Konzentration, um eine grundsätzliche Machbarkeitsaussage machen zu können.

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| MK1: transparenter Anteil > 99%, Steinsalz | MK2: transparenter Anteil ~ 99 - 85%, Verwachsung | MK3: transparenter Anteil ~ 85 - 10%, Verwachsung | MK4: transparenter Anteil < 10%, Anhydrit |

Tabelle 47: Merkmalsklassendefinition Steinsalz - 22/2012

Die Aufschluss- und Verwachsungscharakterisierung kann näherungsweise über ein Henry-/Reinhardt-Schaubild (HR-Schaubild) erfolgen. Dazu wurden die Körner einer Probemenge visuell den vier Merkmalsklassen bzw. Verwachsungsklassen zugeordnet. Zur Bestimmung der Massenverteilung wurden die einzelnen Fraktionen gewogen. Anschließend wurden diese im Wasser aufgelöst, die unlöslichen Bestandteile abgefiltert, getrocknet, verwogen und der Anteil an unlöslichen Bestandteilen bestimmt. Diese Prozedur wurde für die beiden Korngrößenklassen 5/8 und 8/20 mm durchgeführt. Aus den Ergebnissen wurden die HR-Schaubilder abgeleitet, welche in Abbildung 95 und Abbildung 96 dargestellt sind. Unter Einbeziehung der Kornverteilung, welche aus Abbildung 94 ersichtlich ist, kann die theoretische Konzentrationshöhe für einen bestimmten Masseanteil bezogen auf die Gesamtaufgabemenge ermittelt werden.

Aus den beiden HR-Schaubildern ergibt sich eine theoretische NaCl-Konzentration für den 80 %-Masseanteil von ca. 98 % und ca. 94 %. Betrachtet man den Konzentrationszielwert von 97 % in den Schaubildern näher, so ergibt sich dieser für einen Masseanteil von ca. 85 % und ca. 65 %. Nach der Kornanalyse ist der Masseanteil der Fraktion 5/8 mm mit 34,5 % geringfügig höher als jener der Fraktion 8/20 mm mit 30,1 %. Unter diesen Voraussetzungen ist somit die Zielsetzung für eine Mischfraktion 5/20 mm theoretisch nicht erfüllbar. Zur Herstellung eines NaCl-Konzentrates von > 97 % müsste man in der Fraktion 5/8 mm ca. 15% und in der Fraktion 8/20 mm ca. 35 % abtrennen, womit sich ein Auswurfanteil von ca. 25 % bezogen auf die gesamte Aufgabemenge ergibt. Für die Fraktion 5/8 mm alleine wären die Anforderungen auf Grund der Verwachsungscharakteristik erfüllbar. In diesem Beispiel wird der komplexe Zusammenhang von Masseausbringen zu indirekter bzw. optischer Merkmalsklassenverteilung und Korrelation der Klassenqualität zur Produktqualität gut veranschaulicht.

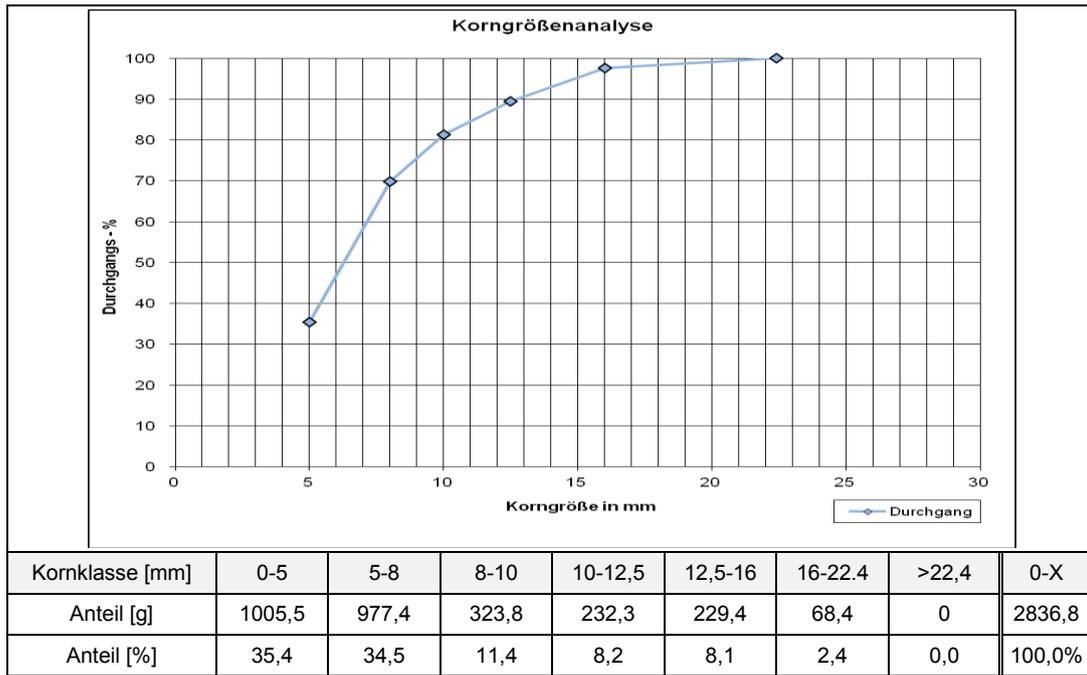


Abbildung 94: Kornverteilung Rohgut Salz-22/2012

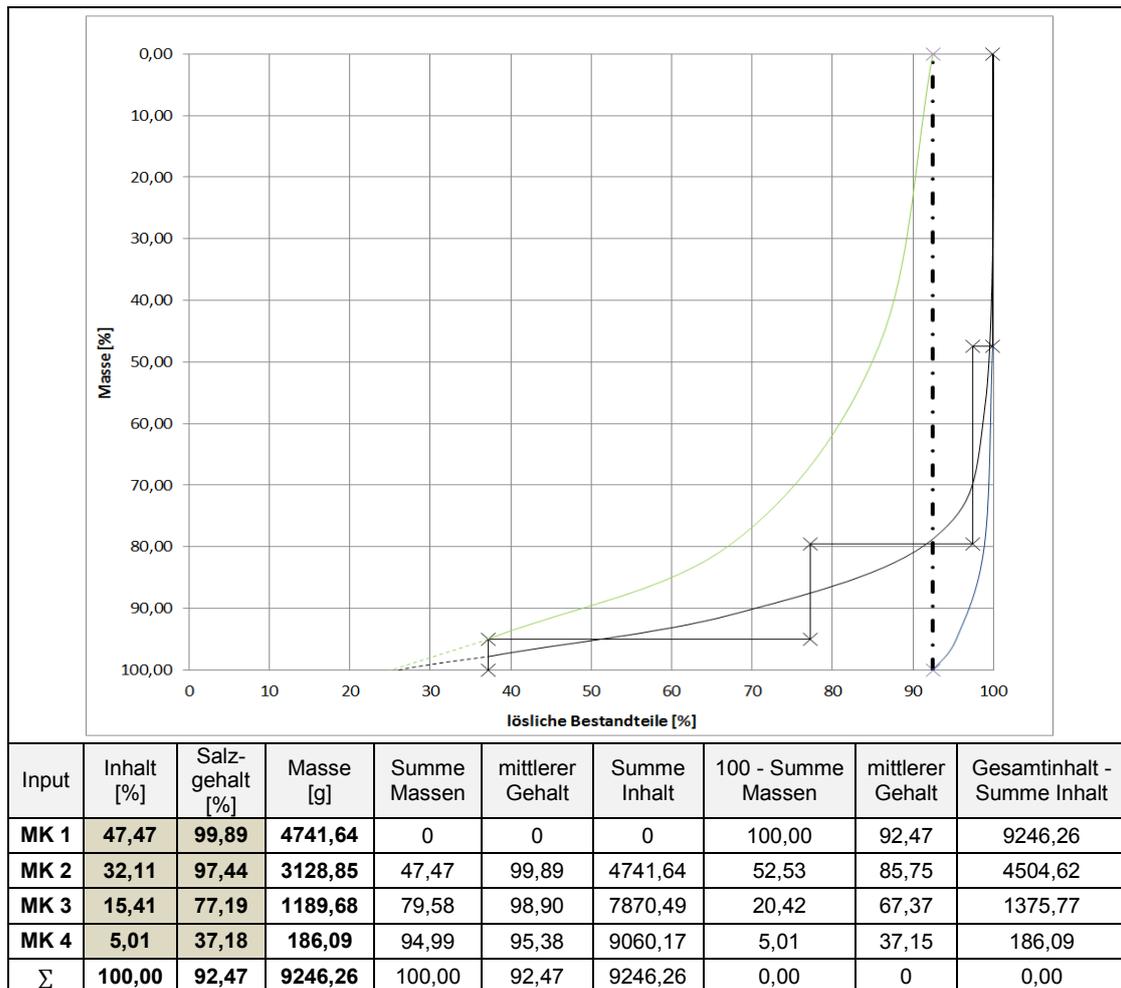


Abbildung 95: Verwachsungscharakteristik der Fraktion 5 – 8 mm nach Henry-Reinhardt

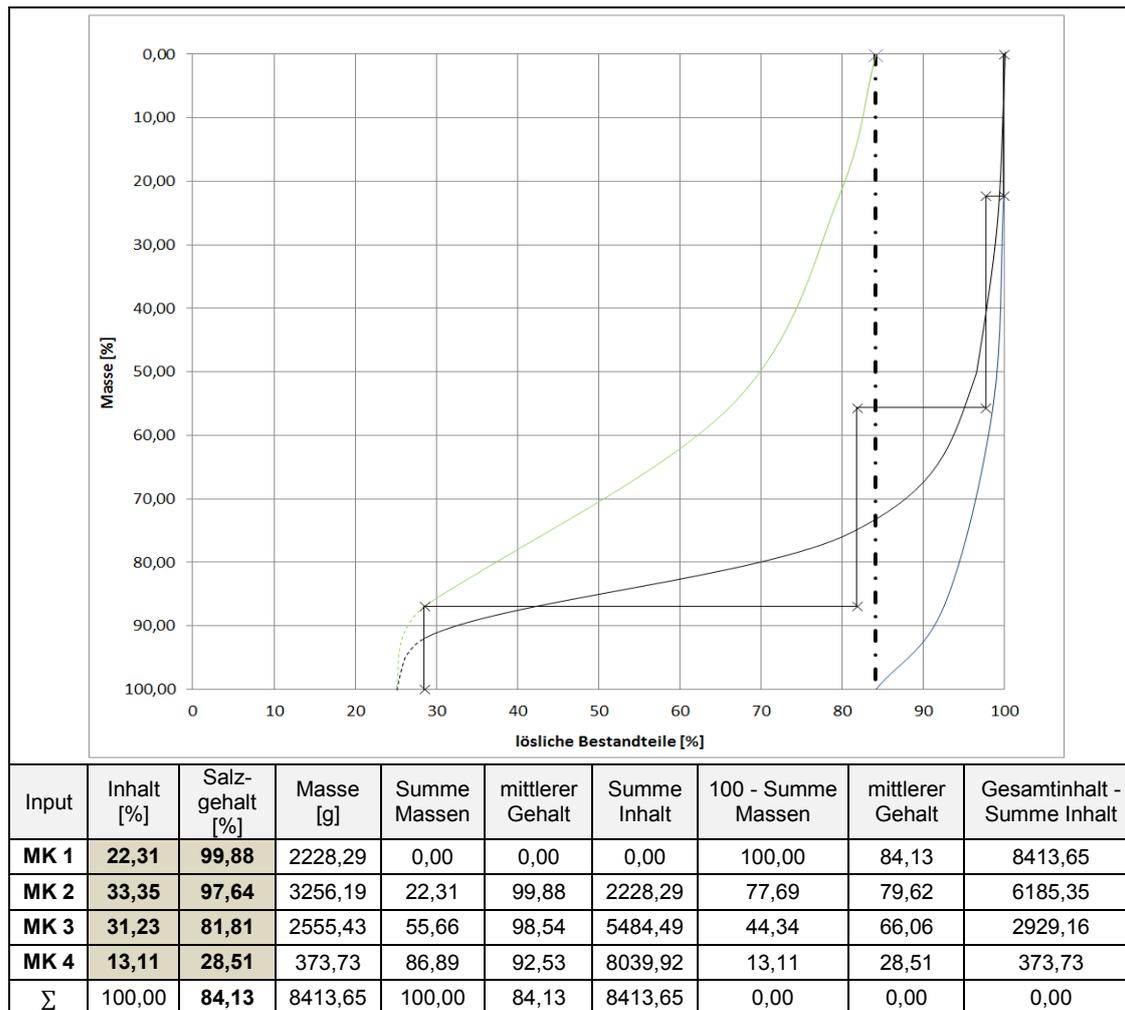


Abbildung 96: Verwachsungscharakteristik der Fraktion 8 – 20 mm nach Henry-Reinhardt

6.4.6.2 Optische Eigenschaften und Detektionstechnik

Wie bereits erwähnt, unterscheidet sich Steinsalz optisch stark von den Begleitmineralen in Bezug auf Transparenz und Farbe. Die optische Analyse ergab, dass auch bei den größeren zu sortierenden Steinsalz-Objekten (MK1) der Transmissionsgrad $T > 10\%$ ist. Hingegen liegt er bei Anhydrit-Objekten (MK4) bei 0% . Daher ist die VIS-basierte Sortierung mit Transmissionsdetektion für diese Steinsalzaufbereitung gut geeignet und wird auch grundsätzlich in der sensorgestützten Salzsartierung eingesetzt. Die Transmissionsdetektion liefert in jedem Fall deutlich bessere Klassifizierungsergebnisse als die Reflexionsdetektion. Mit der Transmissionsmethode bilden sich die dreidimensionale Verwachsungsstruktur der Objekte, wie in Abbildung 97 für die vier Merkmalsklassen dargestellt, zweidimensional ab. Die Ableitung der dreidimensionalen Mineralanteilsverhältnisse aus den 2D-Abbildungsdaten ist natürlich methodenbedingt nicht exakt. Zudem ist die 2D-Abbildung von der zufälligen Lage des Objektes zum Detektionszeitpunkt abhängig. Insbesondere für MK2 und MK3 zeigt sich

die Lageabhängigkeit - betrachtet man die klassifizierten Objekte in Abbildung 97 - durch eine große Varianz der roten und hellblauen Flächenanteile.

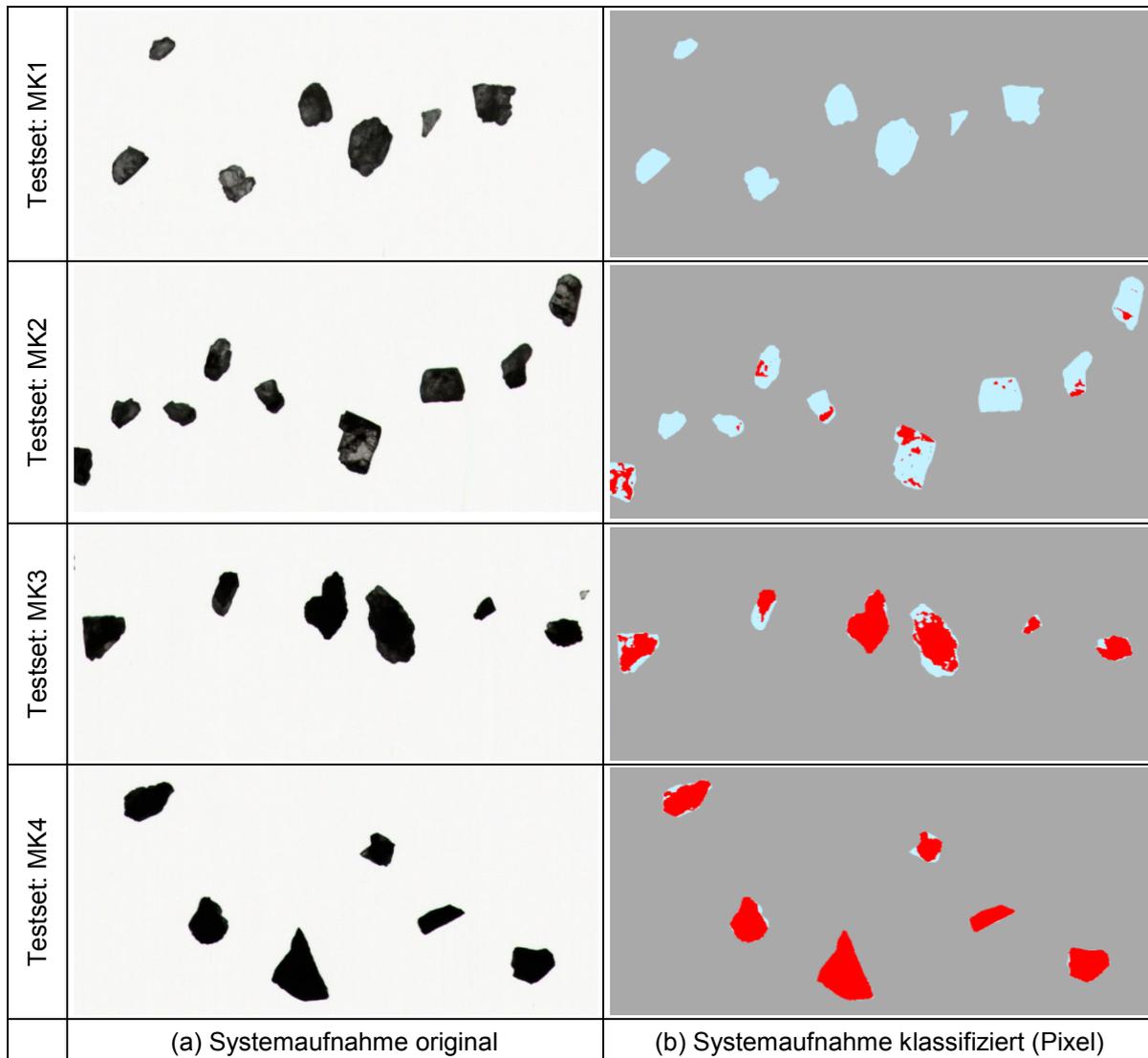


Abbildung 97: Systemaufnahmen (2D-Abbildung) der Transmissionseigenschaft von Steinsalz, Anhydrit und Verwachsungspartikeln der Fraktion 8/20 mm - Merkmalsmustern und Klassifizierungsergebnisse²⁸

Wie aus Tabelle 48 ersichtlich ist, korreliert der aus den 2D-Abbildungsdaten errechnete mittlere transparente Flächenanteil aber gut mit den klassenbestimmenden Mineralanteilsverhältnissen aus Tabelle 47. Die Verwachsungsart und Aufgabenstellung erfordert eine örtlich hochauflösende Detektion von $< 0,2 \times 0,2$ mm/Pixel. Damit lassen sich

²⁸ Farbenzuordnung: transparent bzw. löslich...hellblau, nicht transparent bzw. nicht löslich...rot, Hintergrund...dunkel grau

Aggregaten, insbesondere bei den Aufgaberinnen (2.1, 2.2) und den Sortierern (3.1, 3.2), zu integrieren. Übermäßiger Überdruck im Trennraum führt zu erhöhtem Staubtransport durch den Detektionsbereich, was die Klassifizierung negativ beeinflussen kann. Zudem wird der Wartungs- und Reinigungsaufwand erhöht.

6.4.6.4 Versuchsdurchführung

Die Prozesssimulation nach Abbildung 98 wurde auf einem BIVITEC- und CLARITY VIS-Testsystem im Technikum der Fa. Binder+Co AG durchgeführt. Das Probenmaterial wurde klassiert. Die Fraktionen 5/8 mm und 8/20 mm wurden sortiert. Die Farb- bzw. Merkmalsklassen wurden anhand von Mustern nach Tabelle 47 definiert und darauf basierend eine geeignete Klassifikationstabelle in Abstimmung mit dem Interessenten erstellt. Das Testsystem wurde entsprechend der jeweiligen Sortieraufgabe parametrier³⁰. Die Bewertung des Sortierergebnisses erfolgte über die Bestimmung der nicht löslichen Bestandteile in den Trennfraktionen nach dem Verfahren wie zuvor unter 6.4.6.1 beschrieben.

6.4.6.5 Ergebnisse

Aus den umfangreichen Versuchsreihen seien beispielhaft zwei repräsentative Kampagnen angeführt und genauer diskutiert.

Ausgehend von einem NaCl-Gehalt im Aufgabegut 5/8 mm von 92,65 % ergibt sich aus dem in Tabelle 49 dargestellten Trennergebnis ein NaCl-Gehalt für das Gut- bzw. Durchlaufprodukt von 97,62 %, das Masseausbringen (MK3, MK4, überwiegend unlöslich) der Bergefraktion beträgt 19,94 %. Die hohe Trenneffizienz ist auch visuell gut erkennbar.

Der NaCl-Gehalt im Aufgabegut 8/20 mm von 83,8 % ist nach Tabelle 50 wie zu erwarten deutlich geringer. Der NaCl-Gehalt für das Gut- bzw. Durchlaufprodukt ist mit 97,6 % ebenfalls hoch. Das Masseausbringen in die Bergefraktion beträgt aber 41,72 % und ist damit mehr als doppelt so hoch wie bei der Aufgabefraktion 5/8 mm.

³⁰ MMI-SW: V 1.9.1.2, Sortierrechner-SW: V 1.4.8

| Vers. 1/Aufgabe: Steinsalz 5/8 mm | | | |
|-----------------------------------|--------------|----------------------|------------------------|
| | M [g] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| löslich (~MK1, MK2) | 11806 | 92,65 | |
| unlöslich (~MK3+MK4) | 936 | 7,35 | |
| Summe | 12742 | 100,0 | |

| | | | |
|------------------------|----------------------------|------|--------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | 8,1 | [sec] |
| 3.1-A1: MK3+MK4 | Kapazität auf 480mm: | -- | [t/h]. |
| | max. Kapazität auf 1000mm: | 14,2 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------------|-------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [g] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| löslich (~MK1, MK2) | 1849,8 | 72,8 | | 15,67 | 9956,2 | 97,62 | | 84,3 |
| unlöslich (~MK3+MK4) | 691,2 | 27,2 | | 73,84 | 244,8 | 2,38 | | 26,2 |
| Summe | 2541 | 100,0 | | | 10201 | 100,0 | | |
| r _{m,j} [%] | 19,94 | | | | 80,1 | | | |




Tabelle 49: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.1

| Vers. 4/Aufgabe: Steinsalz 8-20 mm | | | |
|------------------------------------|--------------|----------------------|------------------------|
| | M [g] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| löslich (~MK1, MK2) | 11282,2 | 83,79 | |
| unlöslich (~MK3+MK4) | 2182,7 | 16,21 | |
| Summe | 13465 | 100,0 | |

| | | | |
|------------------------|-----------------------|------|--------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | 8 | [sec] |
| 3.2-A1: MK3+MK4 | Kapazität auf 480mm: | -- | [t/h]. |
| | Kapazität auf 1000mm: | 15,1 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------------|-------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [g] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| löslich (~MK1, MK2) | 3623,6 | 64,50 | | 32,12 | 7658,6 | 97,60 | | 67,88 |
| unlöslich (~MK3+MK4) | 1994,3 | 35,50 | | 91,37 | 188,32 | 2,40 | | 8,63 |
| Summe | 5618 | 100,0 | | | 7847 | 100,0 | | |
| r _{m,j} [%] | 41,72 | | | | 58,28 | | | |




Tabelle 50: Versuchsergebnisse zu Pos. 3.2

Die Ergebnisse decken sich auch tendenziell gut mit den abgeleiteten Erwartungswerten aus den entsprechenden HR-Schaubildern Abbildung 95 und Abbildung 96. Durch Änderung der Sortierparameter können auch andere Qualitäten bzw. Masseausbringens-Verhältnisse praktisch erzeugt werden. Die Versuchsergebnisse dazu sind in Tabelle 51 dargestellt.

| Steinsalz 5/8 mm | | Aufgabe | | Auswurf 1 (A1) | | | Durchlauf (DL) | | | | |
|----------------------|--------------------|---------|----------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | M [g] | g _{i,0} [%] | M [g] | r _{m,A1} [%] | g _{i,A1} [%] | r _{i,A1} [%] | M [g] | r _{m,DL} [%] | g _{i,DL} [%] | r _{i,DL} [%] |
| Vers. 2 (3.1) | löslicher Anteil | 12964 | 92,71 | 2977 | | 78,71 | 22,96 | 9987 | | 97,90 | 77,04 |
| | unlöslicher Anteil | 1019 | 7,29 | 805 | | 21,29 | 79,00 | 214 | | 2,10 | 21,00 |
| | Summe | 13983 | 100,00 | 3782 | 27,05 | 100,00 | | 10201 | 72,95 | 100,00 | |
| Vers. 3 (3.1) | löslicher Anteil | 11317 | 92,52 | 802 | | 64,59 | 7,08 | 10516 | | 95,68 | 92,92 |
| | unlöslicher Anteil | 915 | 7,48 | 440 | | 35,41 | 48,04 | 475 | | 4,32 | 51,96 |
| | Summe | 12232 | 100,00 | 1241 | 10,15 | 100,00 | | 10991 | 89,85 | 100,00 | |
| Steinsalz 8/20 mm | | Aufgabe | | Auswurf 1 (A1) | | | Durchlauf (DL) | | | | |
| | | M [g] | g _{i,0} [%] | M [g] | r _{m,A1} [%] | g _{i,A1} [%] | r _{i,A1} [%] | M [g] | r _{m,DL} [%] | g _{i,DL} [%] | r _{i,DL} [%] |
| Vers. 5 (3.2) | löslicher Anteil | 11386 | 83,63 | 1627 | | 62,22 | 14,29 | 9759 | | 88,72 | 85,71 |
| | unlöslicher Anteil | 2229 | 16,37 | 988 | | 37,78 | 44,33 | 1241 | | 11,28 | 55,67 |
| | Summe | 13615 | 100,00 | 2615 | 19,21 | 100,00 | | 11000 | 80,79 | 100,00 | |
| Vers. 6 (3.2) | löslicher Anteil | 11230 | 84,74 | 2670 | | 60,62 | 23,77 | 8560 | | 96,75 | 76,23 |
| | unlöslicher Anteil | 2022 | 15,26 | 1734 | | 39,38 | 85,78 | 288 | | 3,25 | 14,22 |
| | Summe | 13252 | 100,00 | 4404 | 33,23 | 100,00 | | 8848 | 66,77 | 100,00 | |

Tabelle 51: Steinsalz - Versuchsergebnisse zur Beeinflussung des Masseausbringens mittels Parameteranpassung (Pos. 3.1 und Pos. 3.2)

6.4.6.6 Anlageninstallation

Auf Basis der Machbarkeitsuntersuchungen und der Konzeptionierung nach Abbildung 98 wurde eine industrielle Installation und Prozessintegration in einem Bergwerk unter Tage, wie in Abbildung 99 abgebildet, realisiert. Da die Umgebungsbedingungen sehr trocken und temperaturkonstant sind, waren keine zusätzlichen Konservierungsmaßnahmen oder der Einsatz von korrosionsbeständigen Werkstoffen erforderlich. Die Mengenflussverhältnisse und Produktqualitäten entsprechen den Simulationsergebnissen.



Abbildung 99: Analgeninstallation – Steinsalzsartierung (Quelle: Binder+Co AG)

In Ergänzung zu diesem Fallbeispiel sei auf die Diplomarbeit von Georg Weingrill (13) verwiesen. In dieser wird unter anderem auf die VIS-basierte Sortierung von Steinsalz-52/2013 aus einer österreichischen Lagerstätte der Fraktion 1,4 – 4 mm eingegangen. Die industriell sortierbare untere Korngrenze der vorgestellten Technik liegt aktuell sogar bei 1mm.

6.5 Diskussion und Bewertung

Viele Qualitätsanforderungen von Zwischen- und Endprodukten wie Farbreinheit, Weißegrad, Wertstoff- oder/und Störstoffgehalt können mit VIS-basierten Sortierern unterschiedlichster Ausführung erreicht werden. Durch Weiterentwicklung der Komponenten und Entwicklung neuer Ausrüstungsvarianten im Rahmen des Forschungsprojektes, wie beispielsweise

- zweiseitiger Reflexionsdetektion mit kombinierter Auswertung,
- Reflexion- und Transmissionsdetektion mit kombinierter Auswertung,
- örtlich und zeitlich hochauflösender Detektion,
- zweireihiger Effektorik mit schwerpunktsymmetrischer Ventilansteuerung und
- örtlich feinsegmentierter Effektorik mit schnellschaltenden Sortierventilen,

konnten die Einsatzmöglichkeiten der VIS-basierten Sortierung insbesondere in der Primärrohstoffaufbereitung verbessert werden. Sie sind nun bereits wichtige Komponenten in

verschiedenen Aufbereitungsprozessen und das Einsatzfeld erweitert sich dadurch zunehmend.

Wie in Versuchen gezeigt werden konnte und sich im praktischen Einsatz bestätigte, können durch spezielle Konditionierungsmethoden wie Nass-, Trockenreinigung oder/und Benetzung mit H₂O optische bzw. farbliche Merkmalseigenschaften verstärkt und Signalstreuungen minimiert werden. Dies drückt sich in einer hohen Klassifizierungsgüte und letztlich in Trennungsgraden von bis zu über 95 % aus.

Optische bzw. VIS-basierte Sortierer sind aber auch oft wenig oder nicht geeignet, wenn - wie gezeigt wurde - keine hinreichende optische Differenzierung der Qualitätsklassen bei Bestrahlung mit sichtbarem Licht gegeben ist. Insbesondere bei Primärrohstoffen, mit einer starken Abhängigkeit der optischen Eigenschaften von Genese bzw. Lagerstätte, trifft dies häufig zu. Im Vergleich zu künstlich hergestellten Materialien in gesammelten Reststoffen, variieren die optischen Eigenschaften auch für ähnliche Rohgutarten deutlich stärker und ist die Verknüpfung mit qualitätsbestimmenden Eigenschaften sehr individuell. Dies bestätigen auch die eigenen, im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten, Analysen von über einhundert Rohgut-, Zwischenprodukt- und Reststoffmustern. Dazu ist eine Übersicht der analysierten, überwiegend mineralischen Rohgutarten und Zwischenprodukte in Anhang E abgebildet.

7 Weiterentwickeltes Konzeptionierungsverfahren

Wie in Kapitel 6 dargestellt wurde, bietet die VIS-basierte Sortierung durchaus vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, ist aber auch in ihrem Einsatz beschränkt. Dies führte bei Eignungsuntersuchungen in Bezug auf die sensorgestützte und insbesondere optische Sortierung zur Einsicht, dass es zielführend und notwendig wäre, sensorische Innovationspotentiale und Weiterentwicklungen direkt und systematisch einzubeziehen. Für die Binder+Co AG wurde im Zuge der Forschungsarbeit als Voraussetzung dafür, der für Maschinenbauer sehr typische und in Kapitel 6.3 / Abbildung 63 dargestellte Validierungsprozess weiterentwickelt. Der weiterentwickelte Validierungs- und Konzeptionierungsprozess ist dazu in Abbildung 100 dargestellt.

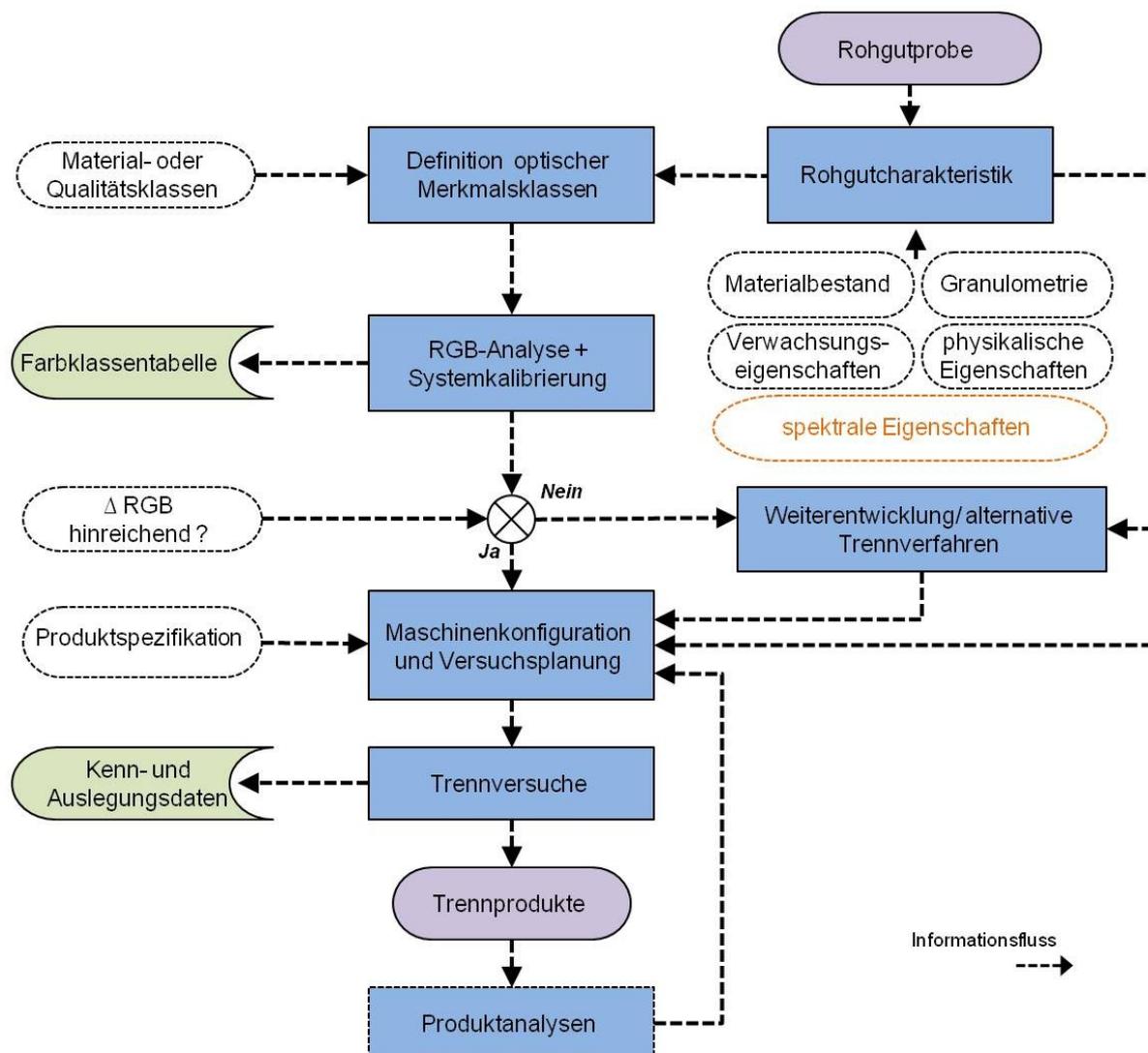


Abbildung 100: Weiterentwickelter Machbarkeitsprüfungs- und Konzeptionierungsprozess

Dabei wird ergänzend zum ursprünglichen bzw. üblichen Prozess systematisch eine erweiterte Rohgutanalyse, welche auch spektrale Rohguteigenschaften berücksichtigt, durchgeführt. Einerseits unterstützt dies die anfragespezifische Eignungsprüfung und andererseits fließen die Ergebnisse unmittelbar in die laufende Komponentenentwicklungen und Prüfung alternativer sensorgestützter Trennverfahren ein. Somit ist eine engere Koppelung der technologischen Entwicklung mit den praktischen Einsatzanforderungen gegeben, welche - insbesondere auf dem Gebiet der Primärrohstoffaufbereitung - oftmals nur mit innovativen Lösungen erfüllt werden können.

Bei der Entwicklung und Durchführung der erweiterten Rohgutanalyse hat sich die interdisziplinäre Kooperation mit den universitären Partnern vom Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Technischen Universität Graz³¹ und dem Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben³² als sehr effektiv erwiesen. Die Organisationen kombinieren und ergänzen ihre Fachkompetenzen und Ressourcen:

- Technische Universität Graz:
 - Know-how zu chemischer und kristalliner Struktur relevanter Minerale und Werkstoffe (Festkörper-Chemie)
 - Know-how auf dem Gebiet optischer Effekte und spektroskopischer Grundlagen (Festkörper-Spektroskopie)
 - Methoden und Messgeräte zur spektralen Analyse von Proben

- Montanuniversität Leoben:
 - Theoretisches und praktisches Know-how bezüglich klassischer Trenntechnologien und Aufbereitungsprozesse
 - Kenntnis zur Einsatzanforderungen und –positionierung sensorgestützter Sortierung in Primärrohstoffaufbereitungsprozessen
 - Weltweite Kontakte zur Bergbau- und Aufbereitungsindustrie
 - Methoden und Messgeräte zur Rohgut- und Produktanalyse

³¹ Im Text mit „TU“ abgekürzt.

³² Im Text mit „MUL“ abgekürzt

- Binder+Co AG:
 - Erfahrung und Know-how zum Einsatz von sensorgestützter, insbesondere VIS-basierter, Sortierung in Sekundärrohstoffaufbereitungsprozessen
 - Know-how und Ressourcen für die Entwicklung von optischen Sortiersystemen
 - Technikum mit Testsystemen

7.1 Erweiterte Rohgutanalyse

Die Basis einer offenen Aufbereitungsverfahrensentwicklung, insbesondere im Bereich der Primärrohstoffe, ist nach gängiger Lehre (49) eine eingehende Analyse und Charakterisierung des Rohguts. Sie steht am Beginn des Auswahlverfahrens bezüglich geeigneter Trenntechnologie und Prozessgestaltung.

Die Rohgutcharakterisierung beinhaltet nach H. Flachberger (79) drei wesentliche Aspekte:

- Stoffbestand - Welche Materialien oder Mineralphasen liegen vor?
- Granulometrie und Verwachsung - Wie sind diese Stoffbestandteile miteinander verwachsen und verbunden?
- Eigenschaften - Welche physikalischen Eigenschaften können für die Trennung genutzt werden?

In Hinblick auf die sensorgestützte Sortierung werden ergänzend zu den typischerweise analysierten Rohguteigenschaften wie

- Stoffbestand und –verteilung,
- Granulometrie und Verwachsungscharakteristik,
- Korngrößenverteilung,
- volumenbezogene und flächenbezogene Dichte,
- Mohs-Härte,
- magnetische Suszeptibilität,

- elektrische Leitfähigkeit³³ und
- Oberflächenbenetzbarkeit

optische und spektrale Eigenschaften mit Hilfe der Festkörperspektroskopie im visuellen und daran angrenzenden Wellenlängenbereiche zwischen 200 bis 2.500 nm wie

- Reflexion,
- Transmission,
- Absorption und
- Lumineszenz

sowie die Sortierung beeinflussende Aspekte wie

- Wasseraufnahmefähigkeit und
- Transporteigenschaft allgemein und insbesondere auf der Rutsche

analysiert.

Die Ermittlung verschiedener spezifischer spektraler Eigenschaften und eine mögliche Kombination dieser stehen dabei im Fokus der Analysen.

7.1.1 Analysemethoden

7.1.1.1 Physikalische Eigenschaften und Granulometrie

Zur Bestimmung von physikalischen Eigenschaften kommen folgende Methoden zum Einsatz:

- Prüfsiebe (MUL, Binder+Co AG) - Korngrößenverteilung
- Heliumpyknometer (MUL, (49)) – Dichtebestimmung, Verwachsungsverhältnisse ausgehend von Reinstoffen (38), (88)
- visuelle Bewertung und manuelle Klaubung (Binder+Co AG, MUL) - farbliche Merkmalsklassenverteilung

³³ Werte sind aufgrund der vielen Einflussfaktoren (Temperatur, Druck, Feuchte, Messgerät, Korngröße) nur mit großem Aufwand messbar. Kennwerte werden primär aus Literaturquellen entnommen.

- mikroskopische Analyse (MUL, Binder+Co AG) - Verwachsungsverhältnisse ausgehend von Reinstoffen
- Festigkeitsbestimmung nach Mohs (MUL, (38)) – Mohs-Härte
- Flächendichtebestimmung (Binder+Co AG, Labormethode³⁴) - Flächendichte
- Randwinkelmethode (MUL, (51)) - Oberflächenbenetzbarkeit
- Isodynamik-Scheider nach Frantz (MUL, (51), (89)) und Magnetwaage mit Magnetitstandard (TU) - magnetische Suszeptibilität

7.1.1.2 Stoff- und Materialbestand

Zur Bestimmung und Absicherung des Stoffbestands des Aufgabeguts und der Trennfraktionen kommen folgende Methoden zum Einsatz:

- Raman-Sonde-Spektroskopie und Mikroskopie (MUL, (13)) – Mineralphasenbestimmung
- XRF-Analysator - Handmessgerät NITON XL3t (Binder+Co AG, (90)) – Mineralphasenbestimmung und chemische Zusammensetzung
- Glühverlust (Binder+Co AG, Labormethode³⁵ abgeleitet aus (91)) – organischer und anorganischer Glühverlust
- Lösungsverfahren nach Standardmethode der Salinen Austria AG (92) (MUL, Binder+Co AG)

7.1.1.3 Spektrale Eigenschaften

Zur Bestimmung spektraler Eigenschaften und Bewertung kommen folgende Methoden zum Einsatz:

³⁴ Rohgutfractionen werden auf einer ebenen Fläche, definierter Größe (z. B.: 0,25 m²), monoschichtig und kontaktbehaftet aufgelegt. Die ermittelte Flächendichte in [kg/m²] ist Basis für die Berechnung der theoretischen rohgutspezifischen maximalen Durchsatzleistung [t/hm]

³⁵ spez. Glühzeit = 1 h für Talk-Magnesit bei einer Temperatur von 1050°C; spez. Glühzeit = 15 min Altglas-Organik bei einer Temperatur von 500°C

- Lumineszenzspektroskopie (TU Graz, Binder + Co AG)
- Reflexions- und Transmissionsspektroskopie (TU Graz, Binder + Co AG)

Um hochwertige spektroskopische Messungen an den relevanten Festkörperproben durchführen zu können, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes geeignete Messgeräte ausgewählt und ein Lumineszenz- Spektrometer LS 55 von Fa. Perkin Elmer (93), ein Reflexions- und Transmissionsspektrometer LAMBDA 950 (94) ebenfalls von Fa. Perkin Elmer sowie ein Spektrometer mit Lichtwellenleiter von Fa. Ozean Optics (95) angeschafft. Desweiteren wurden geeignete Probenpräparationsverfahren, Mess- und Analysemethoden sowie Auswertungsverfahren entwickelt und definiert. Es sei dazu auf die Diplomarbeit von Hofer (96) verwiesen, in der die Grundlagen und Ergebnisse zusammengefasst dokumentiert wurden.

7.1.1.4 Wasseraufnahmefähigkeit

Obwohl die optische Sortierung grundsätzlich ein trockenes Trennverfahren ist, ist die Kenntnis der Wechselwirkung zwischen Aufgabegutstoffen bzw. -materialien und Flüssigkeiten, insbesondere Wasser, sehr relevant. Nicht zuletzt spielt der Wassergehalt bei der in 6.4.1 beschriebenen Verschmutzungsproblematik eine entscheidende Rolle. Aber nicht nur die Funktion von Wasser als Binde- und Lösungsmittel von Schmutzpartikeln an der Objekt Oberfläche ist relevant, sondern auch die Beeinflussung der optischen Eigenschaften direkt etwa als Wasserfilm auf „sauberen“ Objekt Oberflächen oder als aufgenommene H₂O-Moleküle in den äußeren Festkörperbereichen. Wie in 6.4.2.2 an Hand von eigenen Untersuchungen für Quarzkies gezeigt wurde, werden farbliche Unterschiede in Folge von wellenoptischen Effekten verstärkt oder abgeschwächt. Zudem wird elektromagnetische Strahlung im NIR-Bereich von Wasser (H₂O) bei den charakteristischen Grund- und Oberschwingungsniveaus, wie 1.450 und 1.920 nm, stark und breitbandig absorbiert. Ein Wasserfilm auf einer Festkörperoberfläche wirkt ähnlich einem wellenlängenselektiven Filter und verändert entsprechend, wie in Abbildung 101 dargestellt, das Reflexions- bzw. Absorptionsspektrum.

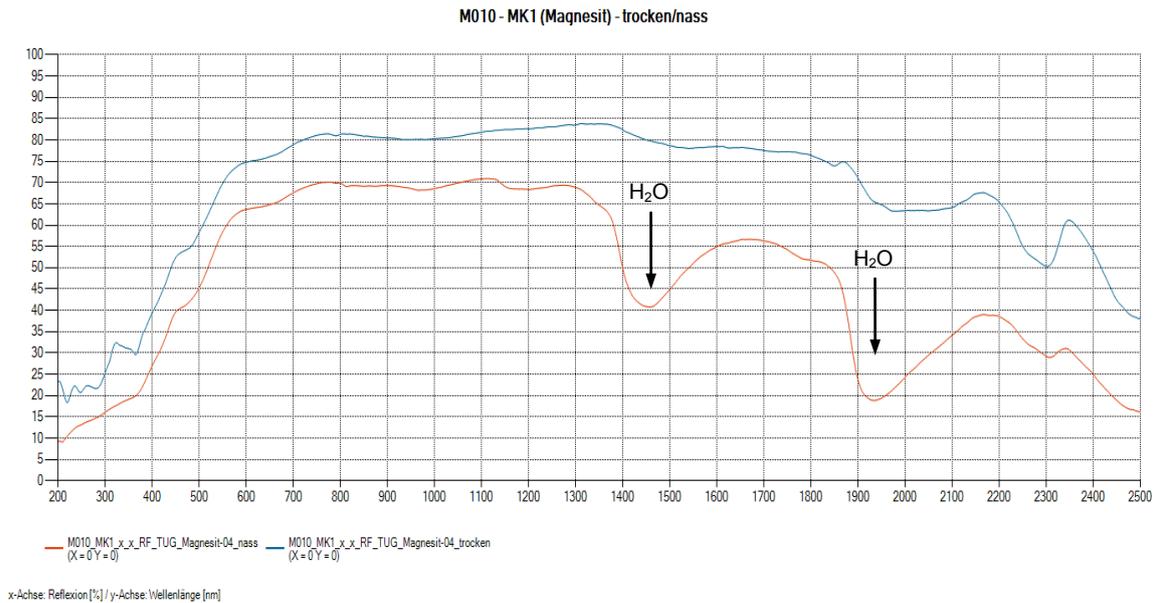


Abbildung 101: Reflexionsspektrum trockener vs. nasser Magnesitprobe

In diesem Zusammenhang ist die Wasseraufnahmefähigkeit bzw. –bindungsfähigkeit, insbesondere von Mineralphasen und Gesteinen, interessant. Sie variiert erheblich und ist von der kristallinen Struktur, der Porosität und spezifischen Oberfläche abhängig. Dies könnte bewusst für die sensorgestützte Sortierung genutzt werden oder ist bezüglich Fördereigenschaften relevant, da etwa hygroskopische Materialien dazu neigen an den Transportflächen stark anzuhafte.

Zur Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit wurde als Grundlage die ÖNORM EN 1097-6, welche normalerweise zur Analyse der Frost-/Tauwechselwirkung auf Straßen- und Gleisbauschotter angewendet wird, herangezogen. Die Methode wurde entsprechend den verfügbaren Mitteln und Einrichtungen der Kooperationspartner etwas adaptiert.

Da die spezifische Oberfläche mit abnehmender Korngröße zunimmt, werden die Materialproben klassiert und die Wasseraufnahmefähigkeit $WA_{24,k}$ nach (7.1) für die jeweilige Kornklasse k mittels Verwiegung der Feuchtmasse M_f und Trockenmasse M_t bestimmt. Dabei ist einem spezifischem Ablauf, der in der Diplomarbeit von Weingrill detailliert beschrieben ist (13), zu folgen.

$$WA_{24,k} = \frac{100 * (M_f - M_t)}{M_t} \quad (7.1)$$

Exemplarisch werden dazu die Analyseergebnisse zu vier Mineralphasen (Abbildung 102) der Kornklasse 12,5/31,5 mm erläutert.

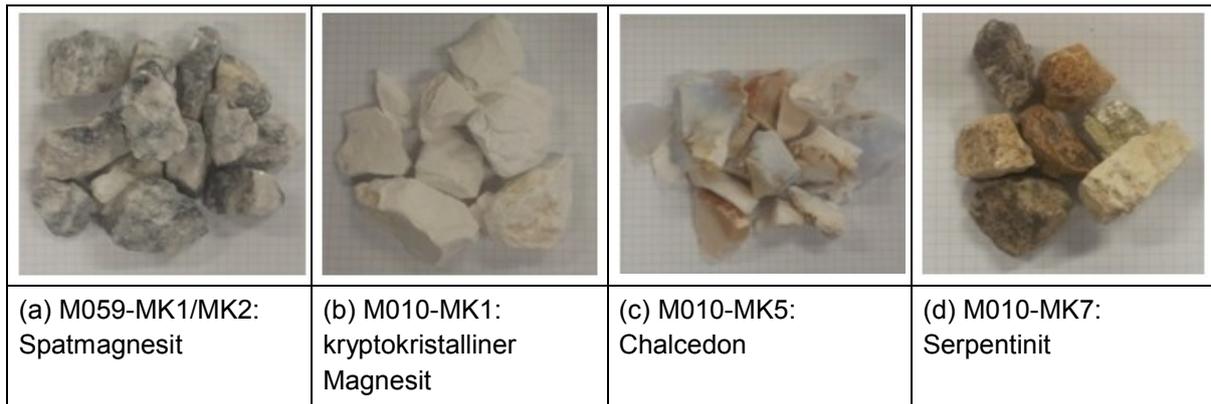


Abbildung 102: Mineralphasen

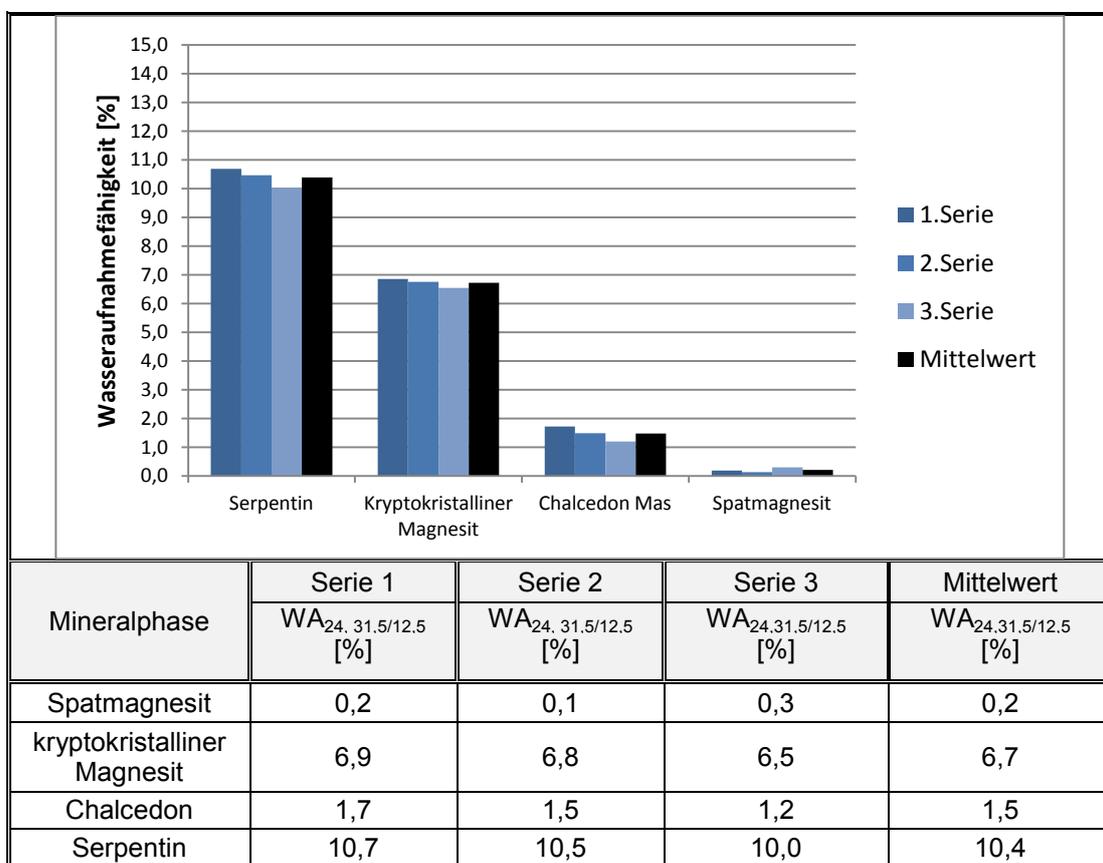


Tabelle 52: Exemplarische Ergebnisse zur Wasseraufnahmefähigkeit; Quelle: (13)

Die Ergebnisse in Tabelle 52 zeigen für den fein-porösen Serpentin mit ca. 10 % und den fein-porösen kryptokristallinen Magnetit aus der Türkei mit ca. 6,7 % eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit. Hingegen weisen der grobkristalline Magnetit aus Österreich mit ca. 0,2 % und der glasig wirkende mikrokristalline Chalcedon mit ca. 1,5 % eine geringe Aufnahmefähigkeit auf (13). Untersuchungen zum Einfluss der Korngröße auf die Wasserfähigkeit zeigten den erwarteten Zusammenhang. Die Aufnahmefähigkeit ist aber klar durch die Mineralphase bestimmt.

7.1.1.5 Transporteigenschaften

Für die Analyse der Transporteigenschaften wurde ein Testaufbau bestehend aus einer frequenzgeregelten Vereinzelungs- bzw. Aufgaberinne und rasch adaptierbaren Rutsche aufgebaut. Die Neigung kann zwischen 45° und 85° variiert werden. Zudem können verschiedene Rutschentypen bezüglich Material und Oberflächenkontur in ein Rahmensystem eingesetzt werden. Mittels high-speed Videoaufnahme des Materialstroms und softwareunterstützter Bewegungsanalyse werden günstige materialspezifische Konfigurationen empirisch ermittelt.

7.1.2 Probenbeschaffung, -beschaffenheit und -präparation

In Hinblick auf das weiterentwickelte Konzeptionierungsverfahren stellt sich die Musterprobenorganisation durchaus anspruchsvoll dar. Materialproben müssen zweierlei Aspekte erfüllen. Einerseits sollte repräsentatives Aufgabegut in Mengen vorliegen, die für die Analyse von Stoffbestand, Kornverteilung und der Verwachsungsverhältnisse sowie für Tastversuche am Sortierer ausreichen. Andererseits sollten möglichst mehrere grobstückige Reinstoff- bzw. Merkmalsklassenobjekte mit einer Körnung > 15 mm für die optisch-spektrale Eigenschaftsanalyse und Einlernphase beigelegt werden. Im Fall von feinverwachsenem Rohgut wie beispielsweise Scheelit oder Granit ist es sinnvoll, sofern verfügbar, auch Pulverkonzentrate der Stoffe für die spektrale Analyse heranzuziehen. Die erforderliche Aufgabegutmustermenge schwankte in Abhängigkeit der Körnung, Schüttdichte und Produktspezifikation zwischen 50 und 500 kg. Die noch geringe Erfahrung mit sensorgestützter Sortierung, insbesondere im Bereich der Primärrohstoffaufbereitung, erforderte eine detaillierte Instruktion der involvierten Personen. Aus Erfahrung erfolgte die Auswahl der Proben idealerweise direkt Vorort in der Anlage oder Lagerstätte durch geschultes Personal.

Für die optisch-spektralen Untersuchungen mit dem Raman-Spektrometer, dem Lumineszenz-Spektrometer LS 55 und dem Reflexions- und Transmissionsspektrometer LAMBDA 950 wurden die Reinproben mit einer Diamantscheibe zerschnitten und die Schnittflächen bzw. Messflächen mit Diamantschleifpapier nass-polieret. Bei der Präparation ist darauf zu achten, dass keine Fremdpartikel in die Oberflächen eingebracht werden.

7.2 Wissensmanagement

Im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsarbeit wurden als Basis und Ausgangspunkt für die eigenen Spektralanalysen veröffentlichte bzw. verfügbare Spektraldaten und Datenbanken, insbesondere von Industriemineralen, recherchiert und bewertet (96).

Aus einer Fülle von im Internet verfügbaren und zumeist kostenlosen Datenbanken wurde eine Auswahl, mit für das Forschungsprojekt relevanten Informationen, getroffen. Für Reflexionsspektren von Mineralien haben sich *ASTER*, *USGS* und *Speclib* als am nützlichsten herausgestellt. Für Informationen zur Fluoreszenzeigenschaft und -spektren von Mineralen sind *Fuomin*, *Mindat* und *FMS - Henkel Glossary* (kostenpflichtig) zu empfehlen. Eine Übersicht mit Internetadressen ist dazu in Tabelle 53 dargestellt.

| Datenbank | Titel | Link |
|----------------|---|---|
| ASTER | ASTER Spectral Library - Version 2.0 | http://speclib.jpl.nasa.gov/ |
| USGS | USGS Digital Spectral Library splib06a2 | http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html |
| SPECLIB | ASU Spectral Library Version 1.1 | http://speclib.asu.edu/ |
| Fluomin | Online Database of luminescent minerals | http://www.fluomin.org |
| Mindat | Mineralogy Database | http://www.mindat.org |
| FMS | Henkel Glossary of Fluorescent Minerals by Dr. Gerhard Henkel | http://uvminerals.org/fms/henkel-glossary |

Tabelle 53: Übersicht nützlicher Datenbanken und deren URL bzw. Internetadressen

Zu bemerken ist, dass viele Daten zu Reflexions- bzw. Absorptionseigenschaften von Mineralen im NIR-Bereich in den einschlägigen Datenbanken vorliegen. Reflexions- und Fluoreszenzdaten im UV-VIS-Bereich sind hingegen wenige zu finden. Ergänzend zu den genannten Fluoreszenzdatenbanken kann dazu auf die Bücher von Gaft (14), Gorebets & Rogojine (45) und Marfunin (97), (98) zurückgegriffen werden, welche umfassend und auf wissenschaftlichem Niveau Fluoreszenzspektren von Mineralien behandeln. In Anhang K ist ergänzend zur Orientierung eine kompakte Klassifikation und Übersicht wesentlicher fluoreszierender Mineralien dargestellt.

Wie erwartet, zeigen die Fluoreszenz-Datensätze für gleiche Mineralarten aus unterschiedlichen Lagerstätten deutliche Abweichungen je nach Aktivatorart und -gehalt. Bei Pulverspektren ist zu berücksichtigen, dass die spektrale Charakteristik zudem von der

Korngröße des Pulvers abhängt. So ergibt sich beispielsweise bei der Analyse von Scheelit-Fluoreszenzspektren aus der ASTER-Datenbank, dass mit steigender Korngröße die spezifischen Charakteristika deutlicher ausgeprägt sind.

Ein Nachteil mancher Datenbank ist, dass die Spektren nur als Bilddaten und nicht als csv-Files vorliegen. Weiter weisen die y-Achsen in den Spektren oft keine Beschriftung auf, sodass man auf die Originalliteratur zurückgreifen muss, um Intensitäten abschätzen zu können. Generell ist zu erwähnen, dass eine Relativmessung der Reflexions- und Fluoreszenzintensität einfach durchgeführt werden kann. Intensitätsdaten sind, wenn Proben mit dem gleichen Gerät vermessen werden, leicht zu vergleichen. Werden aber Daten von unterschiedlichen Geräten verglichen, kann es aufgrund von spezifischen Messgeräteeigenschaften wie zum Beispiel der Abschwächung des Lichtes im Strahlengang des Gerätes selbst zu erheblichen Abweichungen der Ergebnisse kommen.

Die genannten öffentlichen Datenbanken und die einschlägige Literatur erleichtern die Orientierung und geben Anhaltspunkte für die eigene rohgutsspezifische Spektralanalyse. Die Aufnahme der Reflexions-, Anregungs- und Emissionseignisse von repräsentativen Merkmalsklassenobjekten unter Berücksichtigung der Konditionierungsverhältnisse ist aber für die technologische Nutzung in der sensorgestützten Sortierung unbedingt erforderlich.

7.2.1 Rohgutdatenbank - VerDaBa³⁶

Die Fülle an generierten Spektren, Analyse- und Versuchsergebnissen führten zur Entwicklung einer zentralen Datenablage und Verwaltung mittels Datenbank für den firmeninternen Gebrauch. Damit ist eine komfortable und systematische Nutzung bei Machbarkeitsuntersuchungen und der Lösungsentwicklung sichergestellt. Zudem unterstützt eine Datenbankarchivierung auch die Standardisierung der Datensätze und ermöglicht einem erweiterten Personenkreis den einfachen Zugang zu den über Jahre erarbeiteten und aufgebautem Wissen. Derartiges Wissensmanagement ist insbesondere für innovationsgetriebene Unternehmen entscheidend.

7.2.1.1 Datenbankaufbau

Um eine sichere Implementierung auf Microsoft Plattformen zu gewährleisten, wurde als Datenbank der Microsoft SQL Server 2008 Express Edition gewählt. Der SQL-Server ist im gesamten Firmennetzwerk verfügbar und benötigt keine spezifische Treiberinstallation auf den

³⁶ interner Projekt- und Programmname

Bedienstationen. In der zentralen Datenbank werden Ergebnisse aus Rohgutanalysen und Messwertdateien bzw. Spektren eingegeben oder eingespeist. Sortierversuchsergebnisse, Versuchsprotokolle und Fotos der Fraktionen werden weiterhin in einer einfachen Ordnerstruktur abgelegt. Die Grobstruktur ist dazu in Abbildung 103 dargestellt. Die Datenfelder und Verknüpfungen sind in Form eines Datenbankdiagramms im Anhang I abgebildet. Die Verwaltung der Dateien und Ordner erfolgt über die Datenbank und eine entsprechende Bedienoberfläche (GUI).

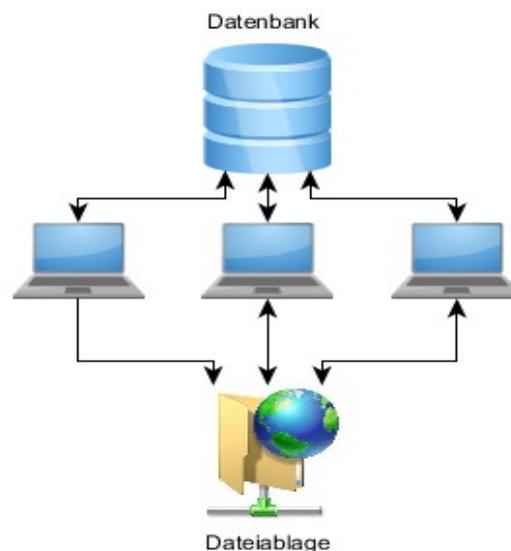


Abbildung 103: Schema der Datenablage und –verwaltung

7.2.1.2 Bedienoberfläche (GUI)

Das GUI wurde in *vb.net 2008* mit *Framework 3.5* geschrieben und wird über eine Installationsroutine auf den Bedienerstationen installiert. Diese beinhaltet alle relevanten Pakete, die zur Ausführung der Oberfläche benötigt werden. Die Bedienoberfläche umfasst Konfigurations-, Eingabe-, Analyse-, und Ausgabemasken.

Konfiguration

Mittels Menüpunkt *Einstellungen* können Masken zur Konfiguration des Programmes geöffnet werden. Über diese Dialoge werden die Verbindungsparameter zur Datenbank und zum Netzlaufwerk sowie das Spaltentrennzeichen der Messwertdateien eingestellt.

Eingabe

Die Eingabemasken können über die Menüpunkte *Berichte* → *Neu*, *Bearbeiten* oder der sogenannten Rohgutmusterübersicht aufgerufen werden. Alle angelegten Datensätze werden

in der Rohgutmusterübersicht, wie sie reduziert in Anhang E dargestellt ist, gelistet und können authentifiziert bearbeitet werden. Die Rohgutdatensätze werden mittels fortlaufender Nummer „xxx“ gekennzeichnet. Diese korrespondiert mit der Musterarchivkennung „Mxxx“ der zugehörigen Rückstellprobe und wird bei Dokumentationen jeglicher Art durchgängig genutzt. Damit ist eine systematische Datenidentifizierung und Verknüpfung möglich. Die Verwaltung der externen Dateien erfolgt über eine spezielle Dateimanagementmaske unter *Bearbeiten* → *Dateimanager*.

Analyse

Die spektralen Messdaten bzw. Messwertdateien der Labor-Spektrometer, Testsenoren und industriellen Sensoren können in einem skalierbaren Diagrammfenster analysiert und verglichen werden. Da diese Funktion wesentlich für die erweiterte Rohgutanalyse ist, ist ein „screen shot“ dazu in Abbildung 104 dargestellt und soll sie im Folgenden näher beschrieben werden.

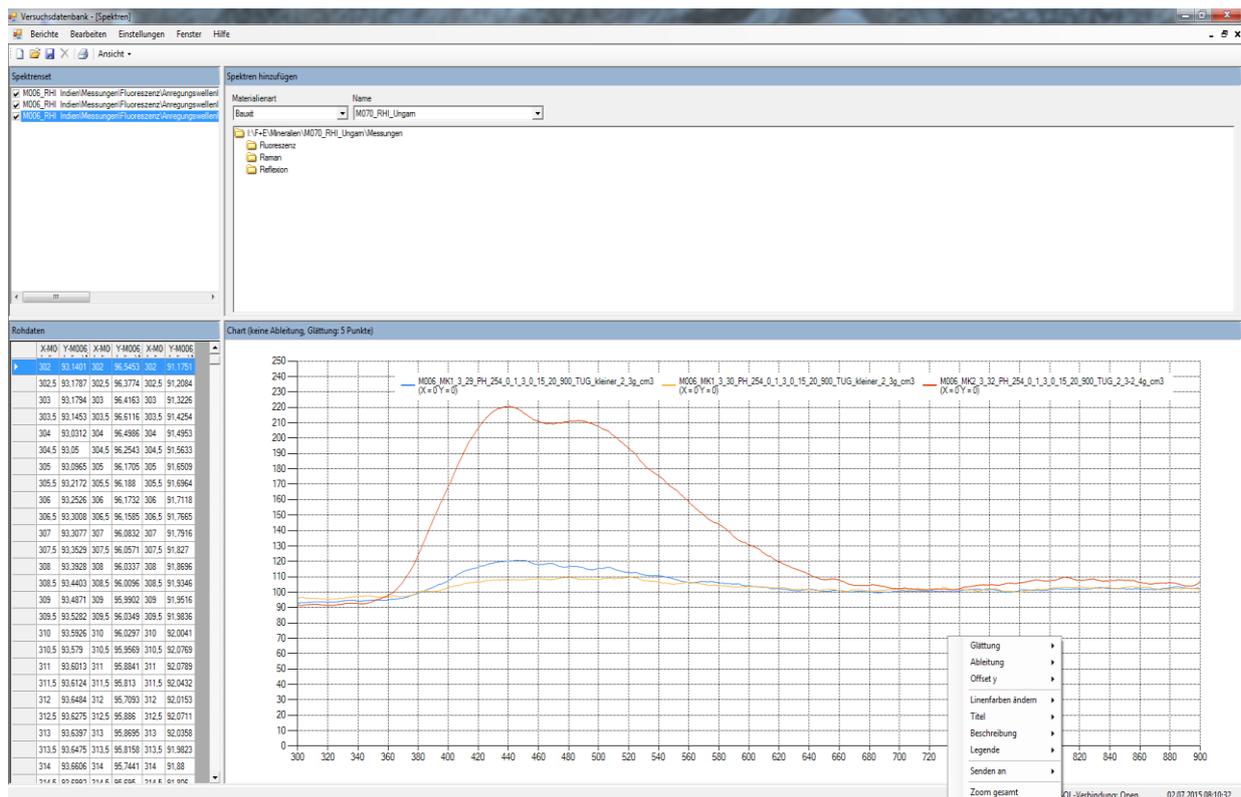


Abbildung 104: Bildschirmausdruck zur Spektralanalyse mit VerDaBa©

Die Maske zur Auswertung der Messwertdateien kann entweder direkt aus einem geöffneten Rohgutstamtblatt oder über einen Menüpunkt *Bericht* → *Spektr* erfolgen. Wird die Maske über das Menü geöffnet, ist eine Filterung nach Materialart und Rohgutkennung möglich. Es können beliebig viele Spektren in eine temporäre Spektrenliste geladen, gespeichert und bei

Bedarf wieder aufgerufen werden. Mittels Auswahlfenster können einzelne Spektren im Diagramm aus- und eingeblendet werden. In der Messdatentabelle werden die Messwerte tabellarisch aufgelistet. Diese können markiert und in die Zwischenablage kopiert werden. Somit wird das Zusammenführen und Exportieren von Messdaten mehrerer Messwertdateien ermöglicht. Der Inhalt der Zwischenablage kann auch zur Weiterverarbeitung in Excel eingefügt werden. Mittels eines Klicks mit der rechten Maustaste auf den Diagrammbereich wird ein Kontextmenü geöffnet. In diesem Kontextmenü werden einfache Funktionen zur

- Manipulation der Kurven (Glättung, erste und zweite Ableitung, Y-Offset, ...)
- Anpassung der Darstellung des Diagramms (Linienfarbe, Diagrammtitel, Beschreibung, Legende, ...) und zum
- Export des Diagramms (Senden an, ...) angeboten.

Mit der linken Maustaste kann ein Fenster aufgezoomt werden. In der gezoomten Darstellung kann der Trend mit einem Klick auf das Mauseis (Pan) verschoben werden. Mittels Druckersymbol können die Rohdaten und das Diagramm ausgedruckt werden. Das Diagramm wird in der aktuellen Ansicht inklusive Legende, Titel und Beschreibung gedruckt. Über den Menüpunkt *Ansicht* können die vier Maskenbereiche aus- und eingeblendet werden.

Die Rohgutstammdaten und Fotos können als Rohgutprotokolle in gedruckter und digitaler Form ausgegeben werden. Für die Erstellung und Ausgabe des Protokolls wird das Softwarepaket *CrystalReport Engine V2.0* von Fa. Microsoft genutzt. Dieses bietet komfortable Möglichkeiten zur Erstellung, zum Export und Ausdruck der Protokolle. Beispielhaft ist im Anhang J das Rohgutprotokoll zu M010/2013 abgebildet.

7.2.2 Musterarchivierung

Es hat sich in Ergänzung zur digitalen Datenarchivierung als zielführend erwiesen auch die spektral analysierten Proben und Merkmalsklassenmuster einzulagern bzw. zu archivieren. So kann bei sich ändernden Rahmenbedingungen, wie beispielsweise bei einer Anpassung der Merkmalsklassendefinition oder neuen sensortechnischen Entwicklungen, darauf zurückgegriffen werden. Zudem stehen sie auch kurzfristig als Vergleichsreferenz bei anderen Machbarkeitsuntersuchungen zur Verfügung. Aktuell umfasst das Musterarchiv der Fa. Binder+Co AG, wie aus Anhang E ersichtlich, bereits über hundert derartige Musterproben.

8 Ergebnisse von spektralen Rohgutanalysen relevanter Proben

Insbesondere die im vorangestellten Kapitel erörterten Methoden der spektralen Rohgutanalyse werden nun seit einiger Zeit systematisch bei der Binder+Co AG angewendet. Sie sind Basis für die grundsätzliche Machbarkeitsbeurteilung und Entwicklung maßgeschneiderter Sortierlösungen in einem erweiterten Spektralbereich von 200 bis 2.500 nm. Im Folgenden wird auf entwicklungsrelevante spektrale Rohguteigenschaften von Mineralen und Glas eingegangen und werden diese an Hand von repräsentativen Beispielen diskutiert. Im Fokus stehen dabei Rohgutproben, für welche die VIS-basierte Sortierung nur bedingt oder nicht eingesetzt werden kann, da die Farbkorrelation und die farbliche Abgrenzung nicht genügend ausgeprägt sind. Dazu sei auch auf die Fallbeispiele in 6.4.1, 6.4.4 und 6.4.5 verwiesen. Soweit möglich und für diese Arbeit sinnvoll, wird auf die in Kapitel 4.4 erörterten Wechselwirkungsursachen von Fall zu Fall eingegangen.

8.1 Reflexion - UV/VIS/NIR

Aufzubereitende Industriemineral- und Erzproben sind zumeist wenig oder nicht transparent. Sie sind daher für die reflexions-basierte Sortierung prinzipiell als geeignet einzustufen, was die Aufnahme diffuser Reflexionsspektren zur Prüfung auf Einsatztauglichkeit notwendig macht. Die mineralischen Proben wurden aus der Binder-Rohgutsammlung (Anhang E) entnommen. Anhand einzelner repräsentativer Beispiele wird insbesondere auf spektrale Aspekte in Hinblick auf eine NIR-basierte Sortierung eingegangen.

Alle Aufnahmen wurden mit der Methode der diffusen Reflexionsmessung auf dem Spektrometer Lambda 950 durchgeführt. Infolge eines automatischen Detektorwechsels bei 810 nm und Lampenwechsels bei 320 nm können an diesen Wellenlängenpositionen in den Reflexions- bzw. Absorptionsspektren messsystembedingte Unstetigkeiten und/oder leichte Niveauunterschiede zwischen den angrenzenden Spektralbereichen auftreten. Diese Messartefakte sind nicht materialspezifisch und werden, sofern sie auftreten, nicht weiter erörtert.

Wie in 4.4.3 bereits im Detail diskutiert, verursachen molekulare Verbindungen und Gruppen in Folge von Ober- und Kombinationsschwingungen im NIR-Bereich mehr oder weniger ausgeprägte Absorptionsbanden. In Tabelle 54 sind im Überblick und als Basis für die

weitere Diskussion wesentliche NIR-aktive molekulare Verbindungen von Mineralphasen aufgelistet. Zudem treten im unteren NIR-Bereich in Folge von Kristallfeld-Effekten, insbesondere durch das Übergangsmetallion Fe^{2+} , Absorptionsbanden auf.

| Molekulare Verbindung | Absorptionsbanden im NIR [nm] |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Hydroxyd (OH^-) | 1250, ~1400 |
| Wasser (H_2O) | 1000, 1200, ~1400, ~1900 |
| Carbonate (CO_3^{2-}) | 1870, 1990, 2160, 2350, 2550 |
| Ammoniak (NH_4) | 1520, 2020, 2110 |
| Fe-OH | 2250, 2330 |
| Mg-OH | 1350, 2100, 2320, 2500 |
| Al-OH | 1750, 2050, 2100, 2200 - 2500 |

Tabelle 54: Relevante und im NIR-Bereich aktive molekulare Verbindungen ausgewählter Minerale und deren Absorptionsbanden; Quelle: (99), (100)

8.1.1 Spektrale Analysen von Fallbeispielen

8.1.1.1 Gips-/Anhydritbruch – M058

Die in Abbildung 105 fotografisch dargestellten Gips- (MK1) und Anhydritmuster (MK2) der Rohgutprobe M058 sind, wie gut ersichtlich, farblich nahezu gleich. Eine farb-basierte Sortierung ist daher zur Trennung nicht geeignet. Gips entstand durch Wasseraufnahme aus Anhydrit oder durch Ausfällung beim Verdunsten von Meerwasser. Die stoffliche Zusammensetzung ist, abgesehen vom Kristallwasseranteil, identisch. Deutlich unterscheiden sie sich etwa hinsichtlich der Dichte, welche für Gips bei $2,31 \text{ g/cm}^3$ und für Anhydrit bei $2,95 \text{ g/cm}^3$ liegt oder bezüglich der Mohshärte, welche für Gips bei 1,5 – 2 und für Anhydrit bei 3,5 liegt (38).

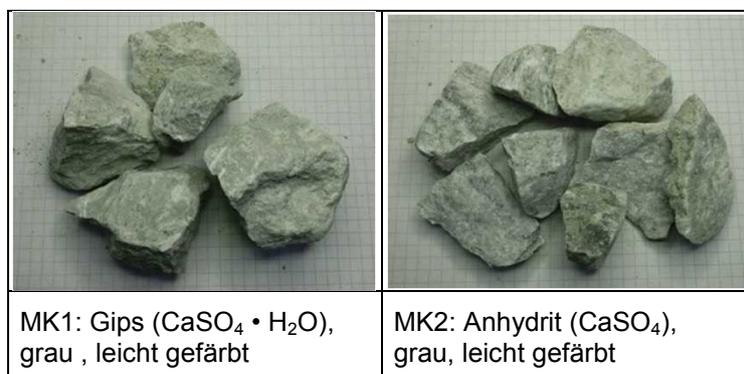


Abbildung 105: Merkmalsklassenobjekte der Rohgutprobe M058

Betrachtet man die in Abbildung 106 dargestellten Reflexionsspektren, so weist Gips (P1) ausgeprägte H_2O - und OH^- -Absorptionsbanden aufgrund von Ober- und Kombinationsschwingungen bei etwa 1.400 und 1.900 nm auf. Bei Anhydrit (P2, P3) sind diese hingegen nicht oder nur sehr schwach ausgeprägt. Zudem treten bei Gips signifikante Absorptionsbanden bei etwa 1.750 und 2.250 nm auf, deren Zuordnung nicht gesichert ist, aber vermutlich auf Al-OH- oder Fe-OH-Absorption zurückzuführen ist.

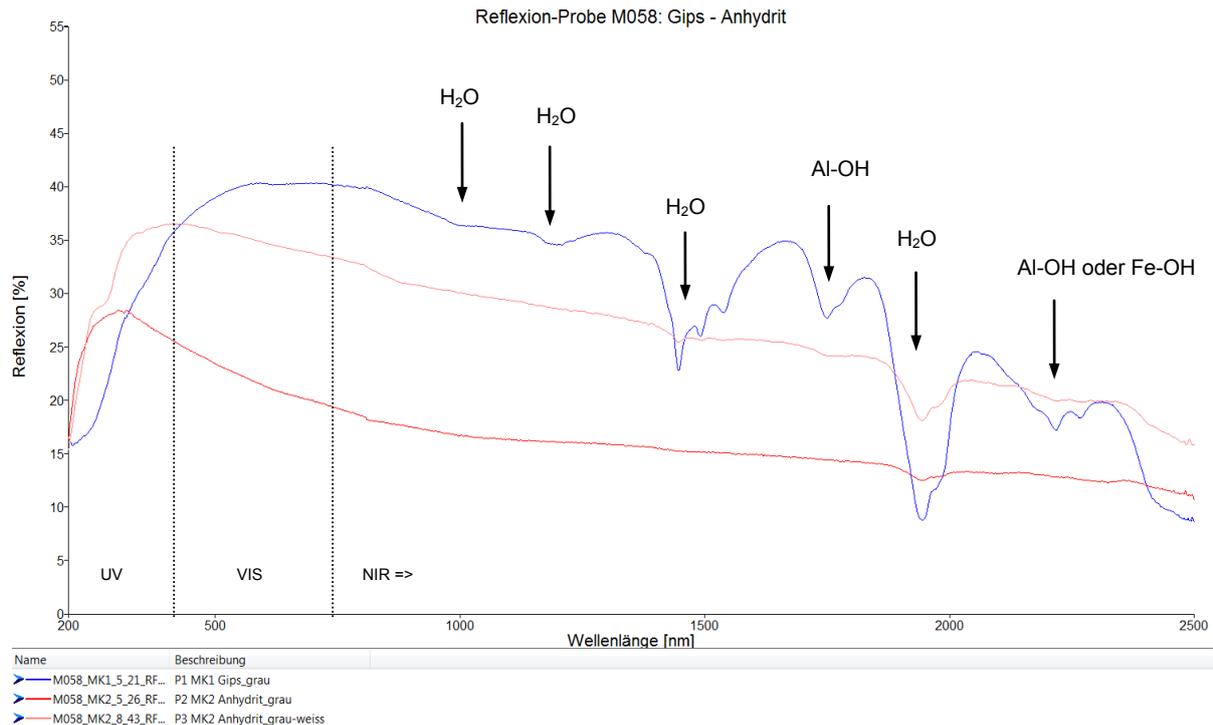


Abbildung 106: Merkmalsklassentypische Reflexionsspektren der Rohgutprobe M058

Diese Untersuchung zeigt, dass sich der Bereich von 1.350 bis 2.300 nm sehr gut für eine NIR-basierte Sortierung dieser Rohgutart eignet. Aufgrund der breiten und markanten Absorptionsbanden könnte ein Detektor mit vergleichsweise geringer spektraler Auflösung von ca. 20 nm eingesetzt werden.

8.1.1.2 Kalkstein – M001

Die in Abbildung 107 fotografisch dargestellten Kalksteinmuster (MK1 bis MK3) der Rohgutprobe M001 unterscheiden sich bezüglich der Ca^{2+} -Gehalte. Die Merkmalsklasse mit dem höchsten Ca^{2+} -Gehalt (MK1) repräsentiert die beste Qualität. Mit sinkendem Ca^{2+} -Gehalt steigt im Wesentlichen der Mg^{2+} -Gehalt und ändert sich der Farbton tendenziell von dunkel zu hell grau. Die Farbtonänderung ist sehr gering und eignet sich, insbesondere im industriellen Prozessumfeld, nur bedingt für eine Sortierung.

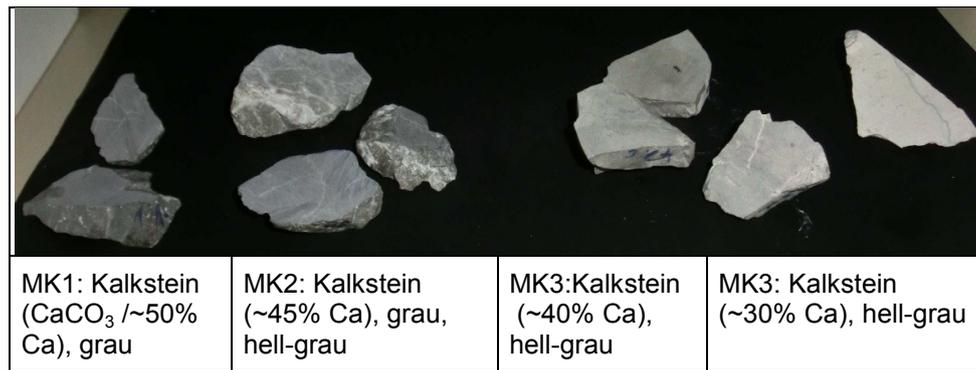


Abbildung 107: Merkmalsklassenobjekte der Rohgutprobe M001 - Ca-Gehalte gemessen mit RFA-Handspektrometer Niton XL3 der Fa. Thermo, Gehaltsangaben in Gewichts-%

Betrachtet man die in Abbildung 108 dargestellten Reflexionsspektren, so weisen alle Kalksteinklassen H₂O- und OH-Absorptionsbanden bei 1.400 und 1.900 nm sowie eine charakteristische CO₃²⁻-Bande bei ca. 2.300 nm auf. Die OH-Absorptionsbanden bei 1.400 nm sind vergleichsweise wenig ausgeprägt. Die Kalksteinmuster mit höherem Ca²⁺-Gehalt (P3, P4) weisen zusätzlich drei schmale und für Calcit typische CO₃²⁻-Banden zwischen 1.800 und 2.250 nm auf.

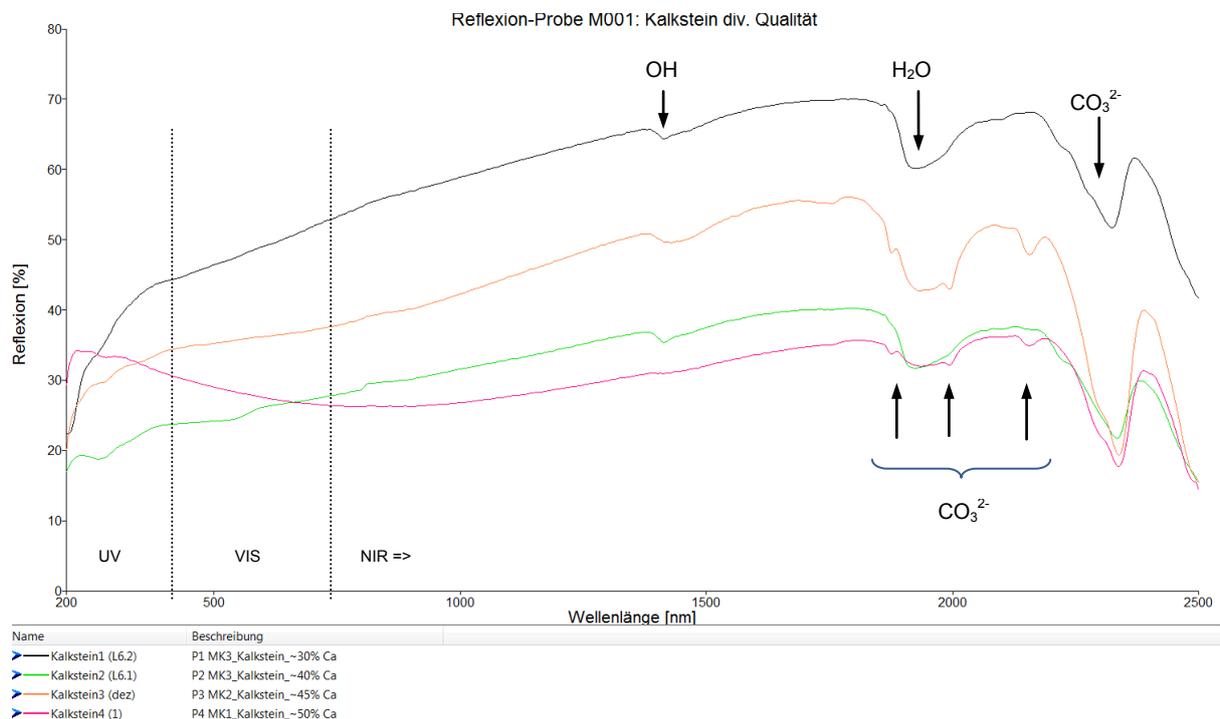


Abbildung 108: Merkmalsklassentypische Reflexionsspektren der Rohgutprobe M001

Spektral unterscheiden sich die Gehalts- bzw. Qualitätsklassen dieser Rohgutart wenig. Nur der Bereich von 1.750 bis 2.250 nm, mit den für Calcit typischen Absorptionsbanden, ist für eine NIR-basierte Differenzierung innerhalb dieser Rohgutart geeignet. Versuche haben

gezeigt, dass eine Differenzierung zwischen MK3 und den anderen beiden Merkmalsklassen MK1 und MK2 zielführend und technisch umsetzbar ist. Auf Grund der schmalen und wenig ausgeprägten spektralen Unterschiede können nur Detektoren mit vergleichsweise hoher spektraler Auflösung von < 5 nm und hoher Empfindlichkeit eingesetzt werden.

8.1.1.3 Magnesitbruch - M010

Die in Abbildung 109 fotografisch dargestellten Merkmalsklassenmuster MK1, MK5b und MK6 der Rohgutprobe M010 unterscheiden sich farblich wenig, aber hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung deutlich. Dolomit (M5b) und Chalzedon (MK6) sind farbbasiert, wie in 6.4.5 erörtert wurde, von Magnesit (MK1) nicht unterscheidbar und damit nicht effizient abtrennbar.



Abbildung 109: Relevante Merkmalsklassenobjekte der Rohgutprobe M010

Betrachtet man die in Abbildung 110 dargestellten Reflexionsspektren, so weisen alle Muster H_2O - und OH -Absorptionsbanden bei 1.400 und 1.900 nm auf, wobei diese bei Chalzedon (P2) am deutlichsten ausgeprägt sind und die Reflexionsintensität oberhalb von 1.400 nm generell vergleichsweise gering ist. Magnesit (P1) und Dolomit (P3) weisen wie zu erwarten die charakteristische CO_3^{2-} -Bande bei etwa 2.300 nm auf. Dolomit (P3) weist zusätzlich drei schmale und für Calcit typische CO_3^{2-} -Banden zwischen 1.800 und 2.250 nm auf. Zur Trennung nutzbare Unterschiede liegen insbesondere zwischen 1.950 bis 2.200 nm und durch eine schmale, ausgeprägte Absorptionsbande bei 1.400 nm beim Dolomit (P3).

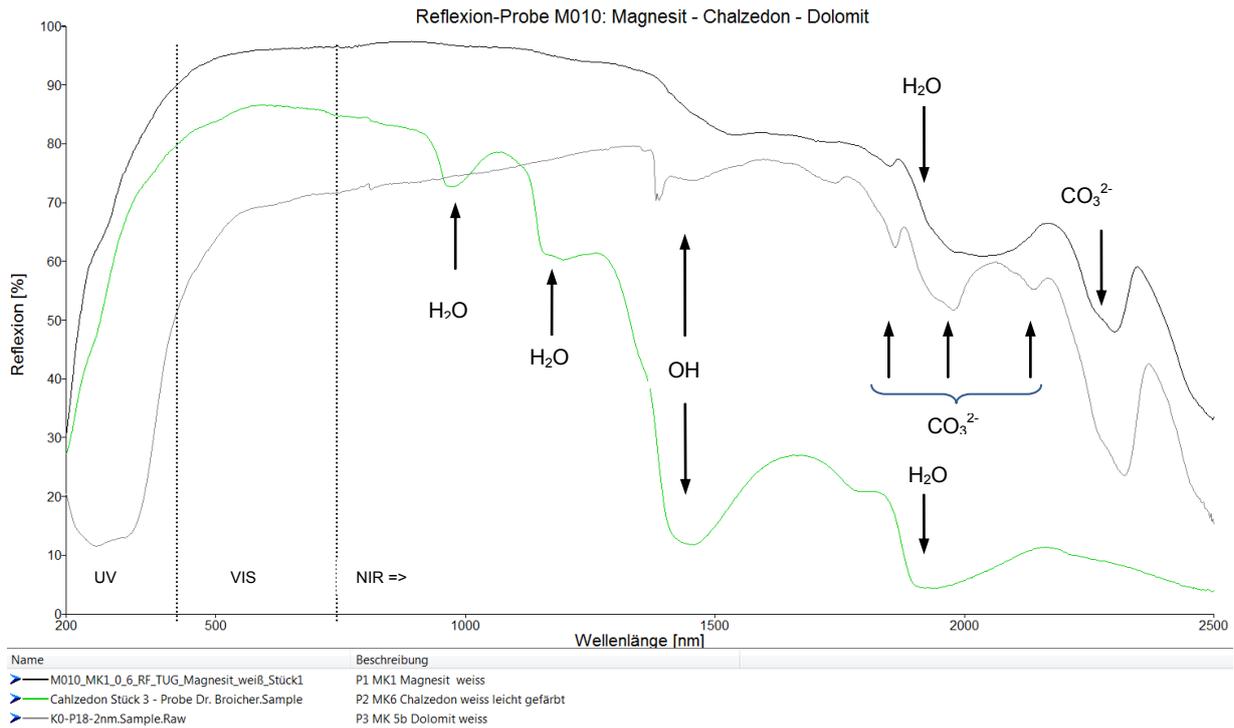


Abbildung 110: Merkmalsklassentypische Reflexionsspektren der Rohgutprobe M010

Spektral unterscheiden sich die Merkmalsklassen bzw. Mineralphasen im NIR-Bereich sehr signifikant und können auch im Bereich bis 1.700 nm voneinander gut unterschieden werden. Detektoren mit spektraler mittlerer Auflösung von ca. 10 nm und vergleichsweise geringer Empfindlichkeit können eingesetzt werden.

8.1.1.4 Talkbruch – M003

Die in Abbildung 111 fotografisch dargestellten Merkmalsklassenmuster MK1 bis MK3 der Rohgutprobe M003 unterscheiden sich wiederum farblich wenig, sehr wohl aber hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung. Magnesit (MK2) und Quarz (MK3) sind als störende Mineralphasen vom Talk (MK1) zu unterscheiden und auszusortieren.

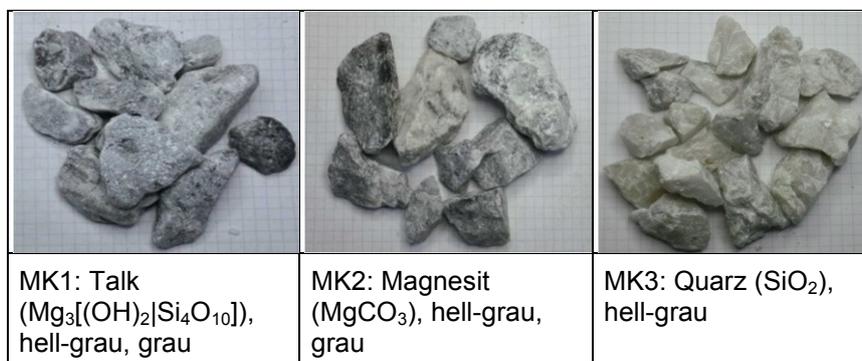


Abbildung 111: Merkmalsklassenobjekte der Rohgutprobe M003

Betrachtet man die in Abbildung 112 dargestellten Reflexionsspektren, so weist Quarz (P3) lediglich breite H₂O- und OH⁻-Absorptionsbanden um 1.400 und 1.900 nm auf. Ansonsten sind keine spektralen Signifikanzen detektierbar, was auf eine hohe Reinheit der Quarzprobe schließen lässt. Magnesit (P2) ist durch die typische CO₃²⁻-Bande charakterisiert. Zudem existiert eine sehr breite Absorptionsbande von 800 bis 1.500 nm, welche vermutlich auf eine Überlagerung der H₂O-Bande bei 1.400 nm und einer breiten Fe²⁺-Bande bei 1.100 nm zurück zu führen ist. Das Spektrum der Talkprobe (P1) weist neben einer breiten Fe²⁺-Bande um 1.100 nm mehrere kleine und scharfe Absorptionsspitzen zwischen 1.250 bis 1.450 nm auf, welche auf Fe-OH-Absorptionen zurückzuführen sind. Die ebenfalls sehr scharfe und ausgeprägte Absorptionsspitzen bei 1.380 nm ist vermutlich auf ein Mg-OH-Absorption zurückzuführen (100). Oberhalb von 1.800 nm sind Absorptionen komplexer OH- und Si-O-Strukturen erkennbar (96).

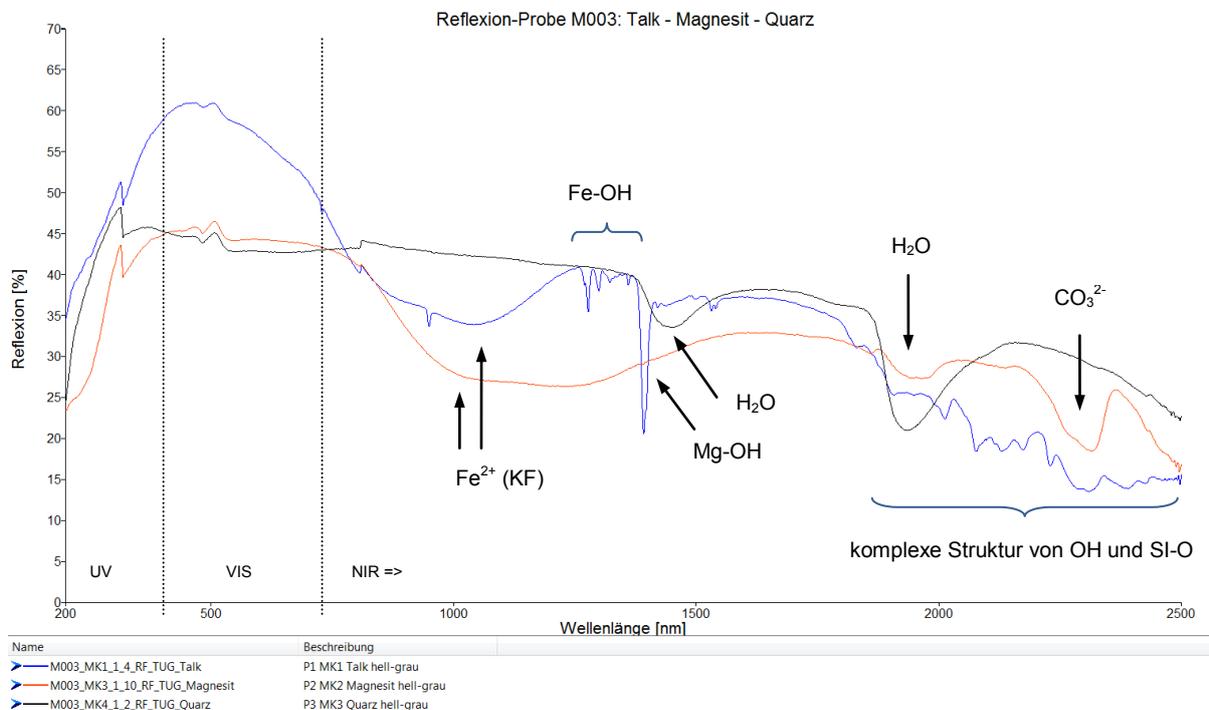


Abbildung 112: Merkmalsklassentypische Reflexionsspektren der Rohgutprobe M003

Spektral unterscheiden sich die Merkmalsklassen bzw. Mineralphasen dieser Rohgutart im NIR-Bereich sehr signifikant und können ebenfalls im Bereich bis 1.700 nm gut voneinander unterschieden werden. Allerdings ist ein Detektor mit spektral hoher Auflösung von < 5 nm und vergleichsweise hoher Empfindlichkeit erforderlich.

8.1.1.5 Quarzbruch – M014

Die in Abbildung 113 fotografisch dargestellten Merkmalsklassenmuster MK1 und MK4 repräsentieren die beste und minderwertigste Quarzqualität aus der Rohgutprobe M014. Die Wertmineralphase Quarz (MK1 bis MK4) und Feldspat (MK6) sind farb-basiert, wie bereits in 6.4.4 erörtert wurde, im Kornbereich von > 35 µm auch mittels kombinierter Reflexions-/Transmissionsdetektion nicht effizient sortierbar.



Abbildung 113: Relevante Merkmalsklassenobjekte der Rohgutprobe M014

Betrachtet man die in Abbildung 114 dargestellten Reflexionsspektren, so unterscheiden sich die Spektren der beiden Quarzproben (P1, P2) doch deutlich vom Quarzspektrum aus der zuvor diskutierten Rohgutprobe M003. Die H₂O-Absorptionsbande bei 1.900 nm ist vergleichsweise schwach ausgeprägt. Bei ca. 1.400 und 2.250 nm befinden sich wenig ausgeprägte schmale spitze Absorptionsbanden. Diese sind auch, aber deutlich signifikanter, im Spektrum der Feldspatprobe (P3) erkennbar und vermutlich auf OH- und Al-OH-Absorption zurückzuführen. Die Kontur der H₂O-Absorptionsbande von Feldspat bei 1.900 nm unterscheidet sich doch erheblich von denen der Quarzmuster. Der spektrale Vergleich und die genauere mikroskopische Betrachtung führen zum Schluss, dass der Quarz dieser Rohgutprobe stark mit Feldspat verwachsen ist. Gut zu erkennen ist auch eine breite Bande um 900 nm, welche höchstwahrscheinlich durch Fe²⁺-Ionen verursacht wird, im Spektrum der braunen Quarz- (P1) und Feldspatprobe (P3).

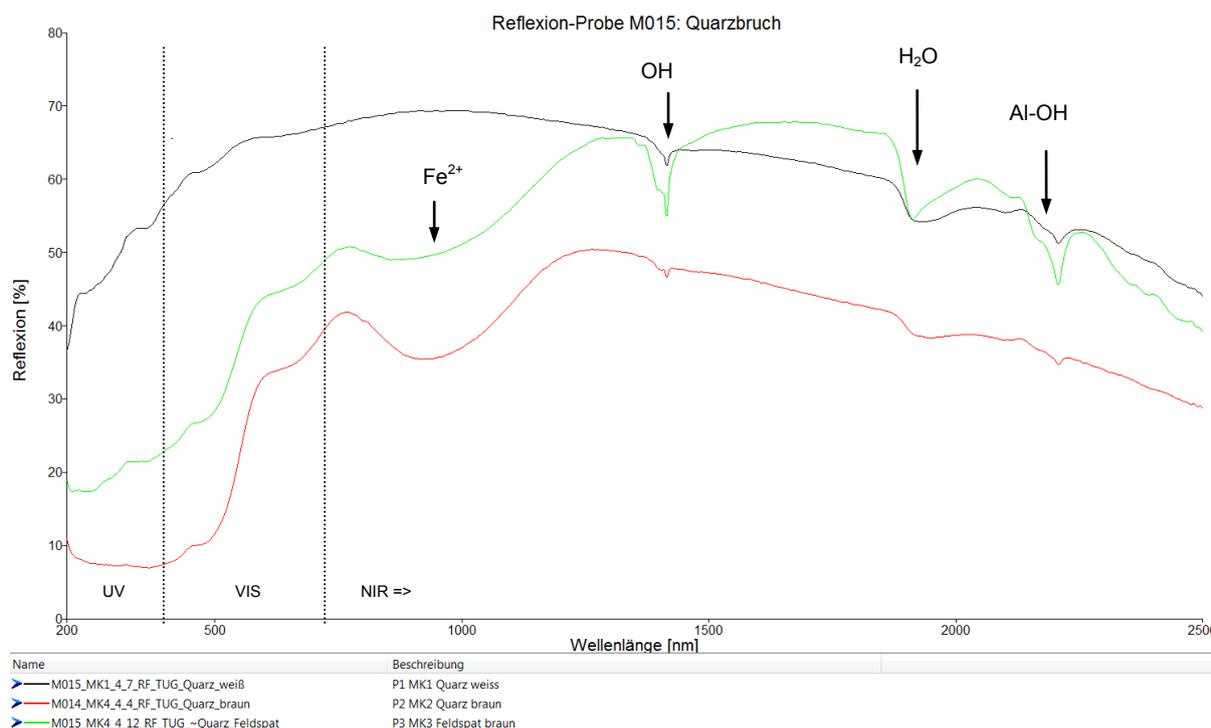


Abbildung 114: Merkmalsklassentypische Reflexionsspektren der Rohgutprobe M014

Spektral unterscheiden sich Feldspat und Quarz dieser Rohgutart im NIR-Bereich doch signifikant und können insbesondere im Bereich von 1.850 bis 2.300 nm voneinander gut unterschieden werden. Ein Detektor mit spektral guter Auflösung von ca. 10 nm und vergleichsweise guter Empfindlichkeit empfiehlt sich zur Detektion.

8.1.2 Fazit zur NIR-basierten Klassifizierung von mineralischen Rohstoffen

Wie schon an Hand der oberhalb diskutierten Beispiele gezeigt werden konnte, weisen Merkmalsklassen praktisch aufzubereitender Rohgutarten verschiedene nutzbare Unterscheidungsmerkmale im NIR-Bereich auf. Obwohl sehr reine Mineralphasen zumeist durch spezifische Reflexions- bzw. Absorptionseigenschaften - dem sogenannten *Fingerabdruck* - charakterisiert sind, beeinflussen

- mikrokristalline und regionale Verwachsungen,
- mikroskopische Variation des Mineralbestands und
- elementare Einlagerungen

diese deutlich. Die Genese und Herkunft des Rohguts sind für die Eigenschaftsvariation wesentlich verantwortlich. Daher kann sich die Erfassung der rohgutsspezifischen Zusammenhänge von mineralogischen und NIR-spektralen Eigenschaften sowie die

Nutzungsbewertung in Hinblick auf die sensorgestützte Sortierung als durchaus komplex darstellen. Dies insbesondere dann, wenn die merkmalsklassenspezifischen Spektren sich nur gering voneinander unterscheiden und/oder das Grundniveau der Reflexionsintensität gering ist. Häufig setzt sich die geringe Intensität von dunklen Partikeln im VIS-Bereich auch im NIR-Bereich fort. Die spektrale Dynamik ist in diesen Fällen gering und mineraltypische Signifikanzen sind kaum oder nicht erkennbar. Eine sichere Klassifikation von dunklen Objekten ist daher auf Grund eines zu geringen Signal-Rausch-Verhältnisses (SRV), insbesondere von industriellen Sensoren, oftmals nicht möglich.

Zudem verursacht, wie bereits in 7.1.1.4 erörtert wurde, an der Oberfläche, in Poren und Hohlräumen lose gebundenes Wasser (H_2O) sehr ausgeprägte Absorptionsbanden und überlagert sich mit denen von kristallin-gebundenen Wassermolekülen bzw. Kristallwasser sowie OH-Gruppen. Sofern das Sortiergut in Folge der vorgeschalteten Aufbereitungsschritte oder der Lagerung oberflächlich nass ist, sollten die H_2O - und OH^- -Bandenbereiche nicht in die Auswertung eingezogen werden oder ist dies bei der Signalauswertung zu berücksichtigen.

8.2 Transmission - UV/VIS/NIR

Bei der sensorgestützten Sortierung von Altglasscherben wird, wie auch in 6.4.1.3 erörtert wurde, im Wesentlichen die Transmissionsfarbe und –intensität genutzt. Die Aufnahme von Transmissionsspektren in einem erweiterten Spektralbereich ist daher insbesondere für Altglasscherben naheliegend und auch Basis verschiedenster Qualitätsanalysen in der Glasproduktion. Aufzubereitende Industriemineral- und Erzproben sind zumeist nicht-transparent. Wenige Minerale, wie beispielsweise Quarz oder Calcit, kommen auch semi-transparent in der Natur vor und sind in Abhängigkeit der Korngröße für die Aufnahme von Transmissionsspektren und für die transmissions-basierte Sortierung geeignet. Alle im Folgenden dargestellten Spektren wurden mit der Transmissionsmethode am Spektrometer Lambda 950 aufgenommen.

8.2.1 Spektrale Analyse von Altglas

In Abbildung 115 sind Transmissionsspektren unterschiedlich gefärbter Kalknatron-Silikatglasscherben aus Altglasfraktionen dargestellt. Im sichtbaren Bereich sind die farbgebenden Absorptionsbanden deutlich erkennbar. Die UV-Absorptionskanten λ_0 liegen, wie für normales Kalknatron-Silikatglas typisch, bei etwa 320 nm. Im Nahinfrarotbereich sind keine signifikanten oder nur sehr breite Absorptionsbanden mit einem Absorptionsmaximum um 1.100 nm - vermutlich von Fe^{2+} -Ionen verursacht - zu beobachten.

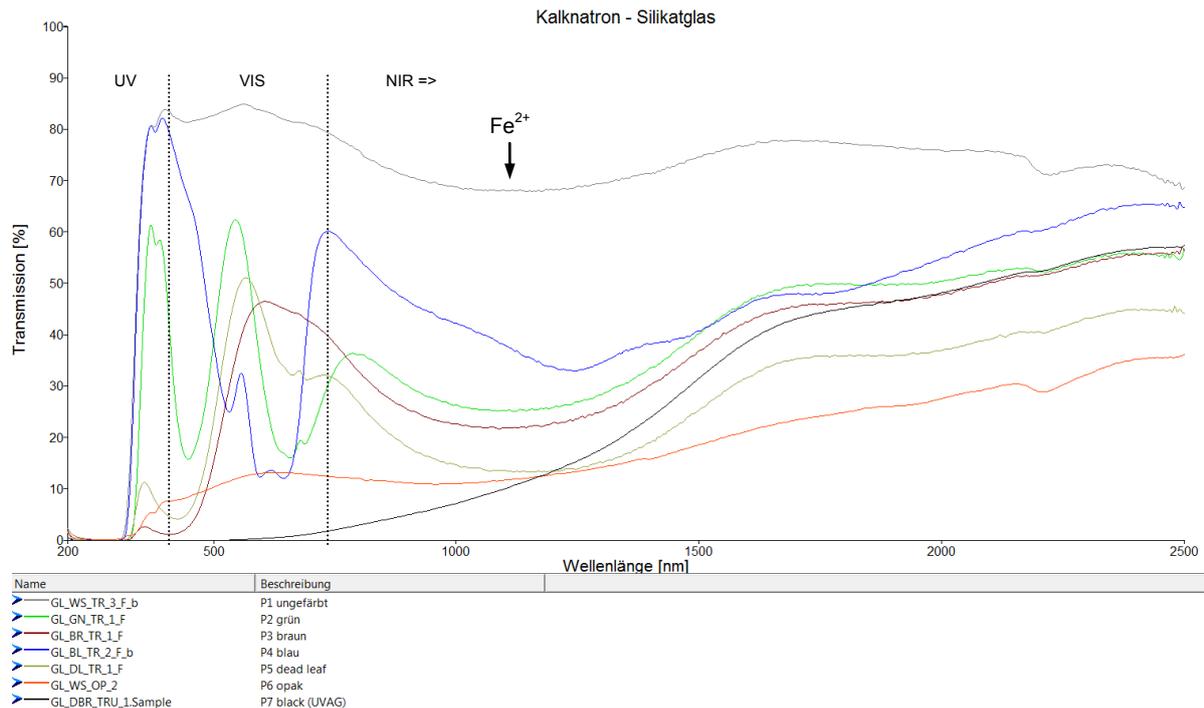


Abbildung 115: Beispielspektren verschieden gefärbter Hohlglasproben aus Kalknatron-Silikat

In 6.4.1 wurde die Problematik der Klassifizierung von gleich oder ähnlich gefärbten Glasscherben unterschiedlicher Glasgrundstruktur mittels VIS-basierter Sensorik erörtert. Insbesondere die problematischen Sonderglasscherben aus Blei-Silikatglas und Glaskeramik können nicht VIS-basiert aussortiert werden.

Es ist einerseits aus der Literatur bekannt, dass die Transmissionseigenschaft von Glas im UV-Bereich bzw. die UV-Absorptionskante in Folge von Inter-Bandübergängen im Wesentlichen von der Grundstruktur bestimmt wird. Andererseits kann der reale Verlauf durch die spezifische Zusammensetzung, Verunreinigungen und das Produktionsverfahren erheblich variieren. Zudem beeinflussen die Schichtdicke und Temperatur den spektralen Verlauf und die Position der UV-Absorptionskante (31). In der Literatur beziehen sich die Analysen zumeist auf eingeschränkte Testreihen und/oder labortechnisch hergestellte Proben. Zur Validierung einer UV-basierten Klassifikationsmethode in Hinblick auf die sensorgestützte Sortierung von Altglasscherben wurde eine umfangreiche Referenzmustersammlung aufgebaut und spektral analysiert. Über dreihundert ausgewählte Proben wurden weltweit von Altglasaufbereitern, Herstellern und Verarbeitern von Glasprodukten organisiert und gesammelt. Im Anhang F ist eine Auswahl daraus abgebildet. Diese gibt einen guten Überblick über die wesentlichen Glasarten bzw. Scherbentypen und die Variationspalette, welche in aufzubereitenden Hohl- und Flachglasfraktionen vorkommen. Detailliert wurden die Analyse- und das Validierungsverfahren durch Ohnewein (7)

dokumentiert. Im Folgenden wird auf die Ergebnisse als Basis für die Sensorikentwicklung eingegangen.

8.2.1.1 Absorptionskante relevanter Glasarten

In Abbildung 116 sind ausgewählte UV/VIS-Transmissionsspektren von industriell hergestellten Scherben unterschiedlicher Glasarten dargestellt. Daraus ist grundsätzlich eine glasart-spezifische isolierte Lage der UV-Absorptionskante, welche durch den Schnittpunkt der jeweiligen Tangente mit der Wellenlängen-Achse markiert ist, ableitbar. Die spezifischen UV-Absorptionskanten der transparenten Kalknatron-Silikat- (P1), Boro-Silikat- (P8) und Glaskeramik-Scherben (P11) liegen in einem mittleren Abstand von etwa 40 nm zueinander. Lediglich die UV-Absorptionskante der Blei-Silikat-Scherbe (P12) liegt im Bereich der Kalknatron-Silikat-Scherbe.

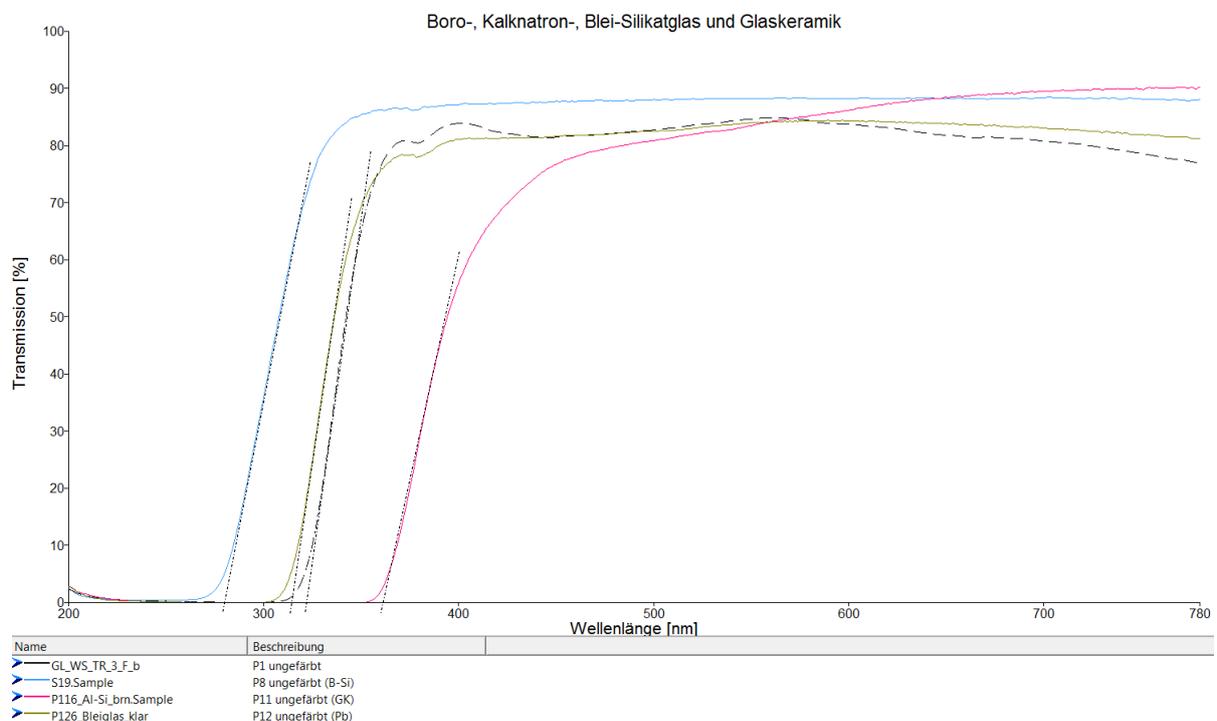


Abbildung 116: UV-Absorptionskanten analysierter ungefärbter Glasscherben

Wie aus Abbildung 117 und Abbildung 118 ersichtlich ist, wird der spektrale Verlauf und die Lage der UV-Absorptionskante durch die Färbung beeinflusst (P2, P10). Insbesondere überlagern sich Absorptionsbanden im UVA- und Blau-Bereich von Metallionen wie beispielsweise Fe^{3+} , Ni^{2+} und Co^{2+} direkt mit der Inter-Bandabsorption. Dies führt zu einer Abflachung oder sogar Auslöschung der glasart-typischen UV-Absorptionskante (P3, P6, P7, P9). In diesen Fällen bzw. bei sehr geringer Transmission im UV/Blau-Bereich ist die Bestimmung der UV-Absorptionskante schwierig bzw. nicht möglich. Starke Absorptionsbanden eines färbenden Metallions können Glasabsorptionskanten bis tief in den

VIS-Bereich vortäuschen. Dies gilt insbesondere für opake (P6, P11) und dunkel braune (P6, P7) Gläser.

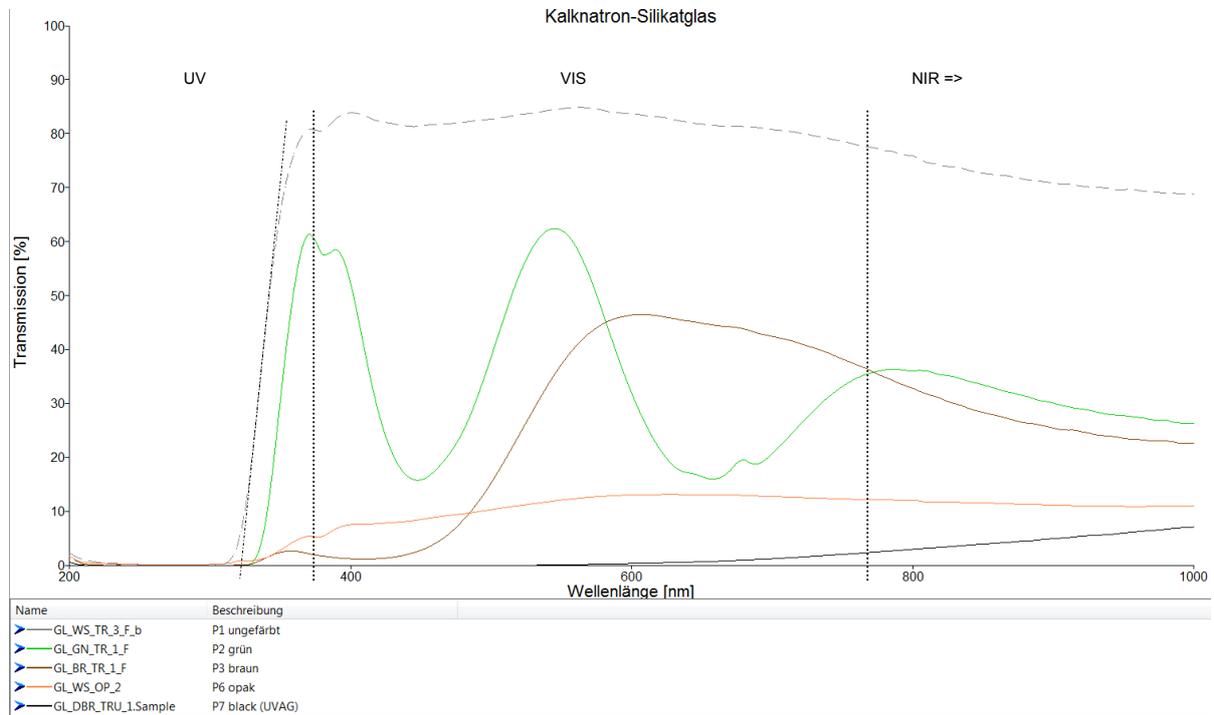


Abbildung 117: Einfluss der Glasfärbung auf die Absorptionskante – Kalknatron-Silikat

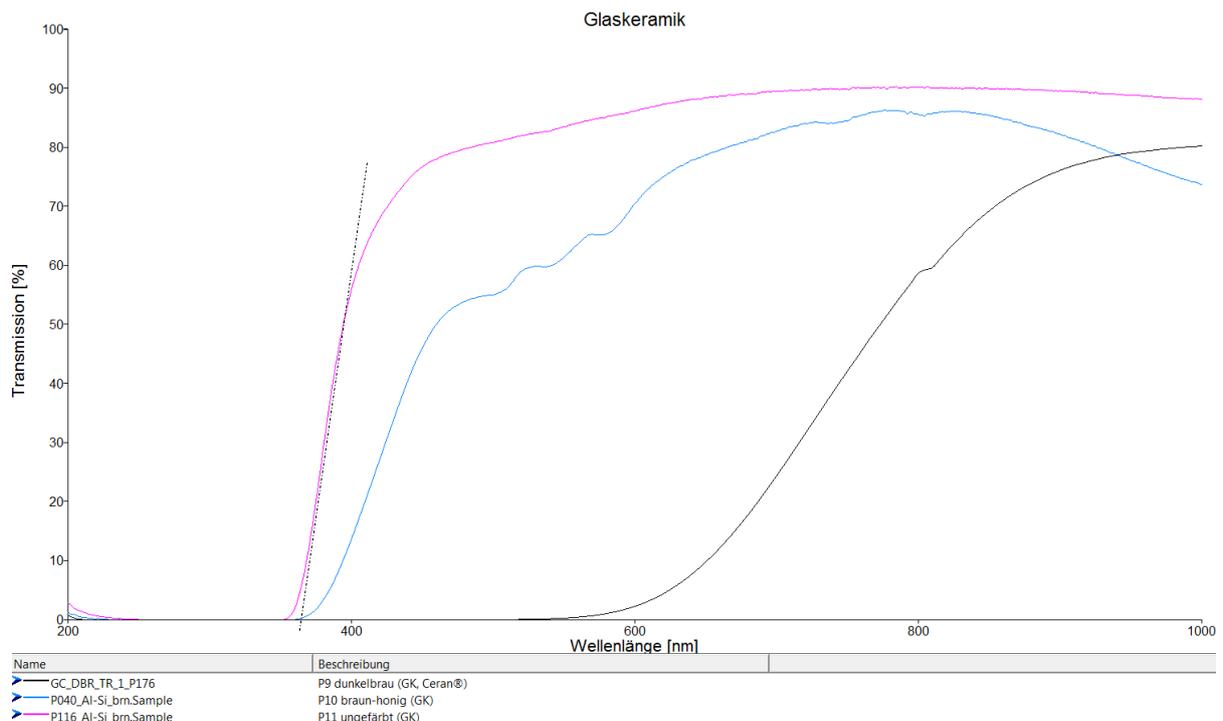


Abbildung 118: Einfluss der Glasfärbung auf die Absorptionskante – Glaskeramik

Ausgehend von den wesentlichen farblichen Ausprägungen von glaskeramischen Scherben bzw. Produkten wurden spezielle Farbklassen definiert und alle Musterspektren entsprechend der Farbklassenzuordnung ausgewertet. In Tabelle 55 sind die Ergebnisse der farbklassen- und glasart-spezifischen Auswertungen der UV-Absorptionskantenposition dargestellt.

| Farbe | Bereichsgrenzen und Mittelwert ($\bar{\lambda}$) der UV-Absorptionskante λ_0 [nm] | | | | |
|--|---|--------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| | Kalknatron-Silikatglas | Glaskeramik | Boro-Silikatglas | Blei-Silikatglas | Quarzglas |
| nicht und leicht gefärbt (unbunt, transparent) ³⁷ | 310-330 (322,5) | 335-400 (367,5) | 275-315 (295) | 305-325 (315) | <200 |
| rauch, grau | 315-350 (332,5) | 390-400 (395) | 295-310 (302,5) | 325-350 (337,5) | k.P. |
| rosa | 320-350 (335) | 380-390 (385) | 300-310 (305) | k.P. | k.P. |
| braun, honig | 320-340 (330) | 360-430 (395) | 300-315 (307,5) | k.P. | k.P. |
| intensiv gefärbt (wenig transparent bzw. opak, dunkel braun, ...) | k.A. | k.A. | k.A. | k.P. | k.P. |

Tabelle 55: Analyseergebnisse zur Position der UV-Absorptionskante in Abhängigkeit von Glasfarbe und –art bei einer Scherbendicke von 4-8 mm (k.A. = keine Auswertung, k.P. = keine Proben)

Über alle ausgewerteten Farbklassen betrachtet überlappen sich die UV-Absorptionskantenbereiche von Glaskeramik mit Kalknatron-Silikatglas nicht. Bezogen auf die Farbklassen sind die Abstände der Bereichsmittelwerte durchgehend groß und liegen zwischen 45 und 65 nm. Die beiden ausgewerteten UV-Absorptionskantenbereiche von Blei-Silikatglas überlappen sich stark mit Kalknatron-Silikatglas, was eine Differenzierung mittels UV-Absorptionskante unmöglich macht. Vergleicht man Kalknatron-Silikatglas und Boro-Silikatglas, so liegen die UV-Absorptionskantenbereiche sehr nahe beieinander und überlappen sich sogar geringfügig bei wenig gefärbten sowie transparenten Scherben. Die Abstände der Bereichsmittelwerte liegen um 30 nm. Die UV-Absorptionskante intensiv gefärbter, dunkler Scherben ist, wie bereits erwähnt, schwer bzw. nicht auswertbar.

³⁷ unbunte bis leicht gefärbte und hoch-transparente Gläser werden branchespezifisch auch als „Weißglas“ bezeichnet.

Eine weitere Beeinflussung der UV-Absorptionskante ist durch die Schichtdicke bzw. Dicke der Scherben gegeben. Grundsätzlich reduziert sich die Transmission und verschiebt sich die UV-Absorptionskante hin zu höheren Wellenlängen bei steigender Dicke. Bei den Analysen zeigte sich, dass die Verschiebung für nicht bzw. leicht gefärbte Scherben vergleichsweise gering ist. Beispielsweise wurde für Glaskeramik mit 5 mm und 10 mm Dicke eine Verschiebung von 12 nm ermittelt. Unter Berücksichtigung der üblichen produzierten Wandstärken in der Behälterglasindustrie von 4 bis 8 mm und der prozessbedingten Vorbehandlung sowie Klassierung variiert die Dicke der Scherben innerhalb enger Grenzen. Der Einfluss auf die UV-Absorptionskante kann für die Masse der Glasscherben vernachlässigt oder gegebenenfalls kornbereichsabhängig kompensiert werden. Bei gefärbten und sehr dicken bzw. kubischen Glasobjekten wie Flaschenbodenbruchstücken kann aber in Folge der geometrisch bedingten starken Transmissionsreduktion die UV-Absorptionskantenbestimmung schwierig sein.

Da die Scherbentemperatur bei der Sortierung prozessbedingt in einem Bereich von +5 bis +40 °C liegt, ist der Temperatureinfluss auf das Transmissionsverhalten ebenfalls sehr gering und vernachlässigbar.

8.2.1.2 Transmission Glas vs. KSP

In 6.4.1.3 wurde die Abgrenzungsproblematik zwischen intensiv gefärbten, wenig transparenten Glasscherben und KSP-Objekten diskutiert. Insbesondere dünne weiße Porzellanscherben können nicht trennscharf VIS-basiert aussortiert werden. Bei üblicher Maschinenparametrierung führt dies zu einer Glas-Übersortierung und Konzentration der oben genannten Scherbenart und Scherben mit großflächigen Etikettenanhaftungen in der Störstofffraktion führen.

In Abbildung 119 sind Spektren problematischer Glas- und Porzellanscherben über den erweiterten optischen Wellenlängenbereich dargestellt. Die Transmissionsverläufe im VIS-Bereich erklären die Problematik. Dünne, weiße Porzellanscherben (P14, P15, P16) weisen vergleichsweise hohe Transmissionswerte auf, welche sogar durchgehend über denen der Glasscherben (P7) liegen und auf sehr konstantem Niveau auch im NIR-Bereich verlaufen.

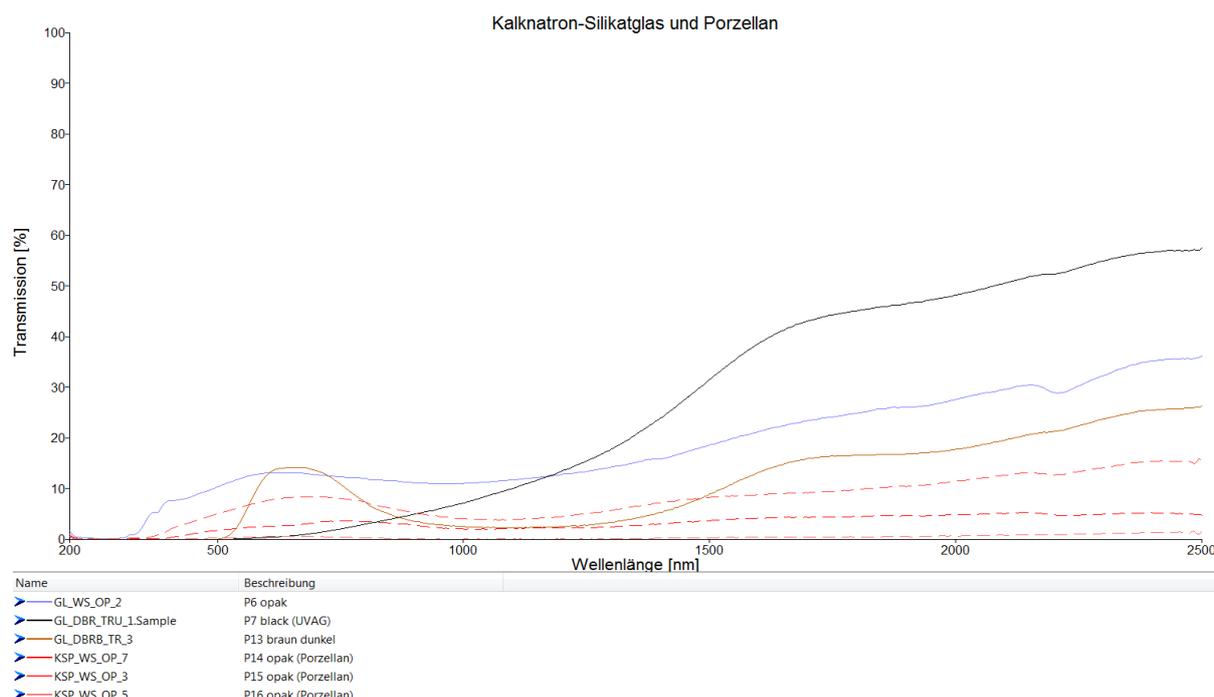


Abbildung 119: Glasscherben mit geringer Transmission vs. Porzellan

Im Unterschied dazu steigt nach der Fe^{2+} -Absorptionsbande bei den analysierten Glasproben (P6, P7, P13) die Transmission im NIR-Bereich kontinuierlich und ab etwa 1.500 nm über das Niveau der Porzellanscherben an. Dies trifft auch auf Glasscherben mit anhaftenden Papieretiketten (P13) zu. Insbesondere trockenes Papier ist im NIR-Bereich sehr transparent und beeinflusst das Transmissionsverhalten vergleichsweise wenig.

8.2.2 Fazit zur UV- oder NIR-basierten Klassifizierung von Altglas

Im Gegensatz zu mineralischem Rohgut ist die stoffliche und spektrale Varianz von Glasscherben deutlich eingeschränkter und definierter. Dies gilt, wie die Analysen zeigen, auch für das Absorptionsverhalten im UV- und NIR-Bereich. Glasarten lassen sich unter Berücksichtigung der Färbung mittels UV-Absorptionskante und glasfremde Störstoffe wie Porzellanscherben über das Transmissionsverhalten im NIR-Bereich klassifizieren und sortieren. Ähnlich wie für die VIS-basierte Sortierung sind eine entsprechende Vorbehandlung und Konditionierung - wie beispielsweise Scherbenreinigung, Klassierung oder Trocknung - Voraussetzungen für die Einsatztauglichkeit und eine hohe Effizienz.

8.3 UV-angeregte Lumineszenz

Bekannt und vielfach publiziert sind Lumineszenzerscheinungen bei Hohl- und Trinkgläsern als Begleiteffekt beim Einsatz bestimmter Oxide zur Glasherstellung oder bei optischen Gläsern als störender Verunreinigungseffekt. Beispielsweise bewirken Oxide, wie UO_2 , PbO , SbO_3 , AsO_3 , CuO oder ZnO zumeist sehr charakteristische und visuell gut erkennbare Lumineszenz (101), (102). Die Publikation „The Henkel Glossary of Fluorescent Minerals“ weist für immerhin 566 von etwa 4.200 bekannten Minerale Lumineszenz aus (103). Vor diesem Hintergrund wurde eine systematische Analyse der Lumineszenzeigenschaften von Glas- und mineralischen Rohgutproben in Hinblick auf eine sortiertechnische Nutzung durchgeführt. Dazu wurde die Referenzmustersammlung für Glasscherben (Anhang F) gezielt mit Feldproben erweitert und mit labortechnisch hergestellten dotierten Proben ergänzt. Der Herstellungsprozess und die Zusammensetzungen sind durch Kieler (35) sehr anschaulich und detailliert dokumentiert. Die mineralischen Proben wurden aus der Binder-Rohgutsammlung (Anhang E) entnommen. Alle spektralen Analysen wurden auf dem Lumineszenz-Spektrometer LS 55 durchgeführt. In Abhängigkeit der Lebensdauer wurde die Fluoreszenzmethode bei kurzlebiger oder die Phosphoreszenzmethode bei langlebiger Lumineszenz angewendet. Die Anregungs- und Lumineszenzintensitäten werden in den Diagrammen in arbitrary units als [a.u.] oder [#] angeben. Bezüglich Details zur Vorgangsweise und zu den Messsystemeigenschaften wird auf Hofer (96) verwiesen. In Anhang L sind als Unterstützung für die weiteren Erörterungen ein Aufbauschema und Kennwertdiagramme des LS 55 dargestellt. Zu den fotografischen Abbildungen sei angemerkt, dass diese tendenziell in Abhängigkeit von Kamera und Beleuchtung farblich vom visuellen Eindruck bzw. der Beschreibung abweichen können. Im Folgenden wird auf relevante probenspezifische Analyseergebnisse als Basis für die Sensorikentwicklung eingegangen.

8.3.1 Ermittlung von Anregungs- und Emissionsspektren

Zur Ermittlung der grundsätzlichen probenspezifischen Anregungs- und Emissionseigenschaften wurden dreidimensionale Intensitätsprofile bzw. 3D-Intensitätsprofile aufgenommen.

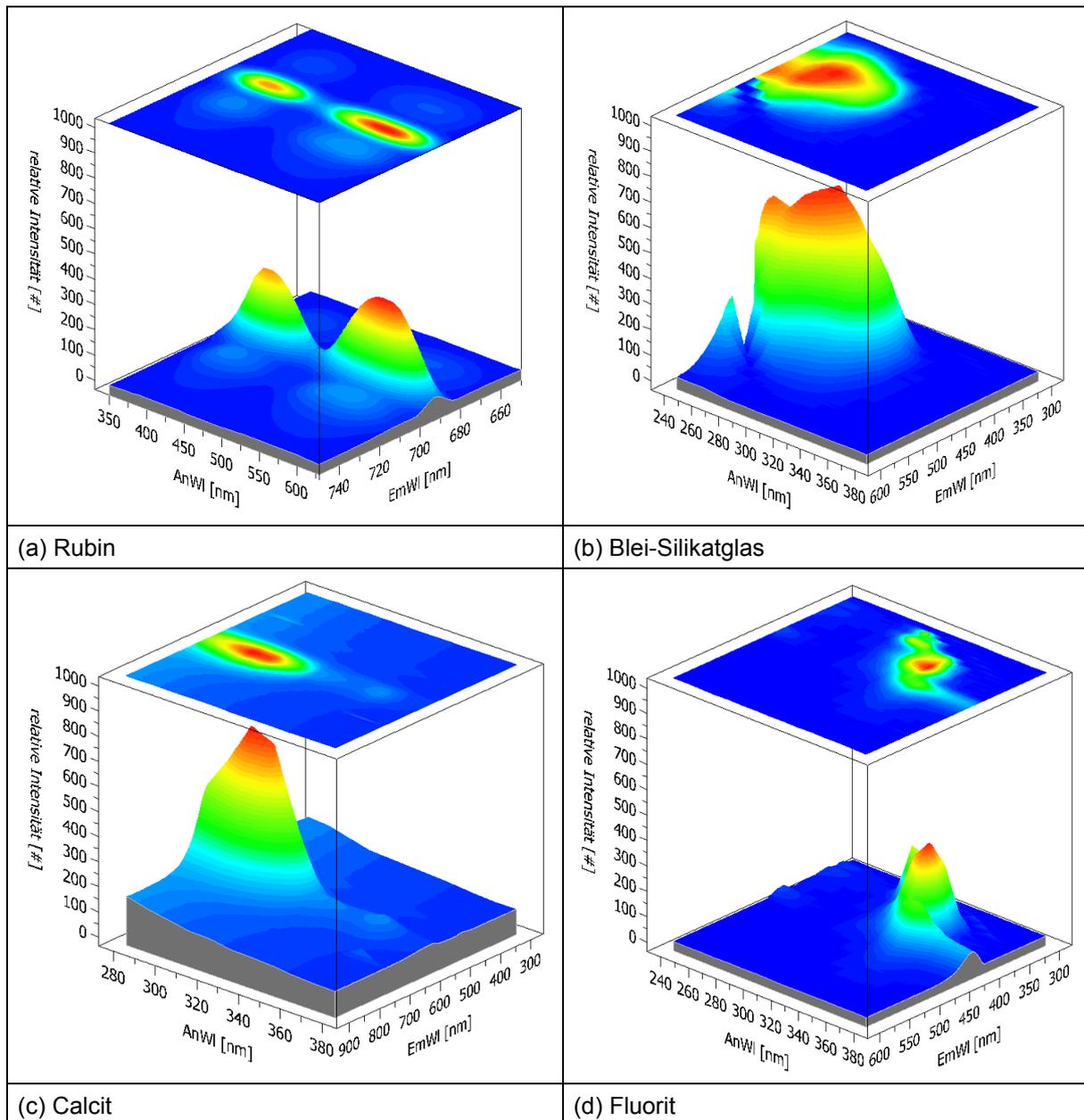


Abbildung 120: Beispiele für 3D-Intensitätsprofile von analysierten Rohgutproben

In Abbildung 120 sind dazu beispielhaft 3D-Intensitätsprofile von lumineszenz-aktiven Bleiglas-, Rohrubin-, Calcit- und Fluoritproben dargestellt. Auf der x-Achse ist die Anregungswellenlänge (AnWI), auf der y-Achse die Emissionswellenlänge (EmWI) und auf der z-Achse die relative Intensität aufgetragen. Aus den probenspezifischen 3D-Intensitätsprofilen bzw. Anregungs- und Emissionsspektren lassen sich, sofern Lumineszenzeigenschaften gegeben sind, die charakteristischen Anregungs- und Emissionsmaxima A_{\max} bzw. E_{\max} sowie die zugeordneten Wellenlängen $\lambda_{A_{\max}}$ bzw. $\lambda_{E_{\max}}$ und Halbwertsbreiten $\Delta\lambda_{A_{\max}/2}$ bzw. $\Delta\lambda_{E_{\max}/2}$ ableiten.

In Abbildung 121 ist für die Blei-Silikatglasprobe das Emissionsspektrum bei einer Anregung mit 270 nm (Cut@270) und das Anregungsspektrum bei einer Emission mit 390 nm (Cut@390) dargestellt. Dies entspricht auch den jeweiligen Maxima-Wellenlängen im 3D-Intensitätsprofil. Die Emissions-Halbwertsbreite $\Delta\lambda_{E_{max}/2}$ beträgt 110 nm und die Anregungs-Halbwertsbreite $\Delta\lambda_{A_{max}/2}$ etwa 100 nm. Die breitbandige Fluoreszenz ist geprägt durch den $s^2 \rightarrow sp$ Übergang von Pb^{2+} (104).

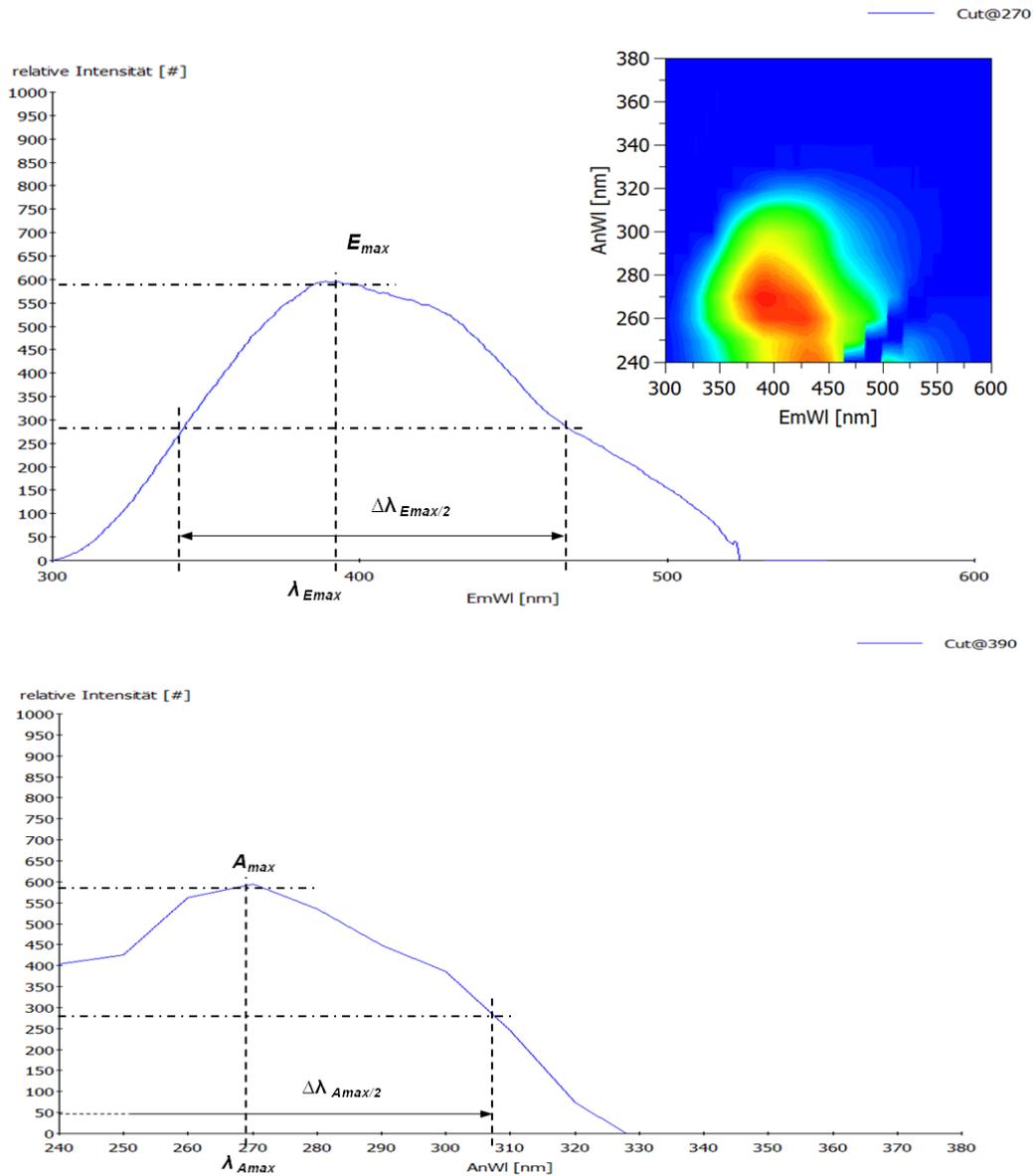


Abbildung 121:Anregungs- und Emissionsspektrum einer Blei-Silikatglasprobe

Unter Umständen können, wie in Abbildung 122 am Beispiel einer Rubinprobe dargestellt, auch mehrere Anregungs- oder Emissionsmaxima vorliegen. Im diesem Fall liegen zwei getrennte Anregungsmaxima mit λ_{A1max} bei 405 nm und λ_{A2max} bei 560 nm vor.

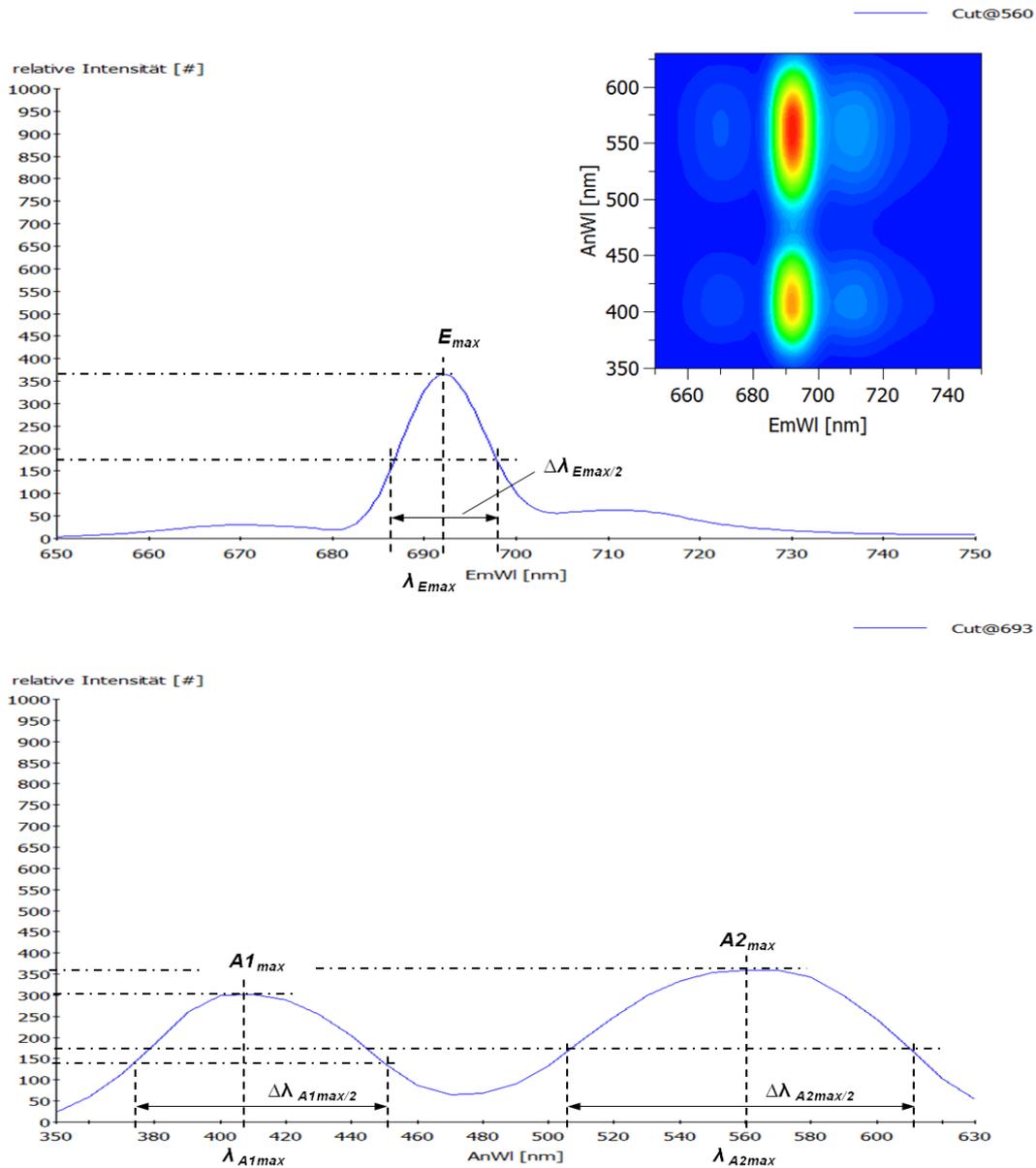


Abbildung 122: Anregungs- und Emissionsspektrum einer Rubinprobe

Beide Anregungsbereiche regen eine sehr schmalbandige Lumineszenz mit $\lambda_{E_{max}}$ bei 693 nm an. Die Halbwertsbreite $\Delta\lambda_{E_{max}/2}$ dieser Emissionsbande beträgt lediglich 10 nm. Wie in 4.4.4 erörtert, ist diese Fluoreszenzerscheinung Cr^{3+} zuzuordnen.

In Tabelle 56 sind die Anregungs- und Emissionskennwerte aller vier in Abbildung 120 dargestellten Probenbeispiele zusammengefasst.

| Probe | λ_{A1max} | $\Delta\lambda_{A1max/2}$ | λ_{A2max} | $\Delta\lambda_{A1max/2}$ | λ_{E1max} | $\Delta\lambda_{E1max/2}$ | λ_{E2max} | $\Delta\lambda_{E2max/2}$ |
|--------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| Blei-Silikat | 270 | 100 | - | - | 390 | 110 | - | - |
| Rubin | 405 | 75 | 560 | 105 | 693 | 10 | | |
| Calcit | 305 | 40 | - | - | 625 | 90 | - | - |
| Fluorit | 325 | 25 | - | - | 420 | 60 | - | - |

Tabelle 56: Beispielhafte Zusammenstellung von Anregungs- und Emissionskennwerten untersuchter Proben - abgeleitet aus den 3D-Intensitätsaufnahmen mit LS 55

Das für die Analysen genutzte Lumineszenzspektrometer LS 55 besitzt keine spezifischen bzw. automatisierten Funktionen zur direkten Messung der probenspezifischen Quantenausbeute und Lebensdauer. Zudem konnten keine zuverlässigen Angaben zur Bestrahlungsstärke bzw. Energiedichte im Detektionsbereich seitens des Herstellers zur Verfügung gestellt werden. Es wurden im Rahmen der Inbetriebnahme Gerätekenndaten ermittelt und Methoden entwickelt, die eine indirekte qualitative Bewertung dieser Kenngrößen ermöglichen.

8.3.2 Bestrahlungsstärke

Die Bestrahlungsstärke I_0 [W/m^2] bzw. [W/cm^2] an der Messfläche ist der Bezugswert für die Machbarkeitsbewertung. So wurde mittels Referenzmessungen in Abhängigkeit der Anregungsspaltweite zwischen 2,5 bis 15 nm eine Bestrahlungsstärke von 10^{-5} bis 10^{-4} W/cm^2 für das LS 55 ermittelt. Wie aus Tabelle 57 abgeleitet werden kann, ist sie im Vergleich zu industriellen Systemen gering.

| Quelle / Messsystem | Bestrahlungsstärke an der Messfläche [W/cm^2] |
|--|---|
| Xe-Blitzlichtlampe / LS 55 – Messkammer (96) | $10^{-5} - 10^{-4}$ |
| UVC-Röhre / Sortiersystem Binder + Co - Detektionsbereich | $8 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$ |
| UVA-LED-Line / Sortiersystem Binder + Co – Detektionsbereich | $5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$ |
| Laser / industrielle LIF-Detektion – Detektionsbereich (105) | $2,17 \cdot 10^{-3} - 5,59 \cdot 10^3$ |

Tabelle 57: Bestrahlungsstärke verschiedener Lumineszenzsysteme

Anhand dieser Bestrahlungssituation ist davon auszugehen, dass mit LS 55 angeregte Lumineszenz auch mit industriell eingesetzten Anregungsquellen bzw. verfügbaren Bestrahlungsstärken sicher angeregt werden kann.

8.3.3 Quantenausbeute

Für eine einfache und qualitative Bewertung der Quantenausbeute bzw. –effizienz wurde eine Referenzmethode entwickelt. Ausgewählte Glas-, Mineral- und eine nicht lumineszierende hochreine Polysiliziumprobe wurden bei definierten Geräteeinstellungen vermessen und rechnerisch zueinander referenziert (96). Die Ergebnisse sind dazu in Abbildung 123 dargestellt.

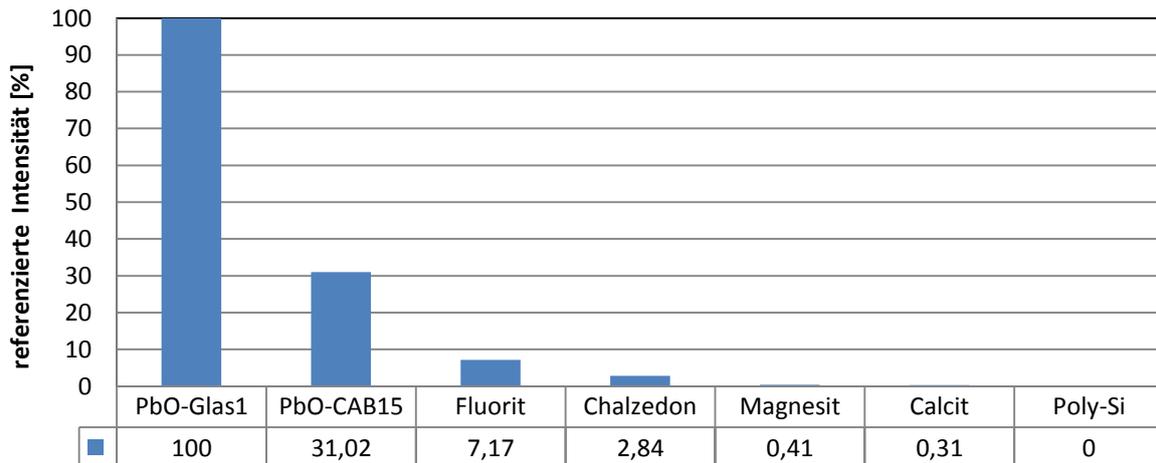


Abbildung 123: Referenzierte Intensität diverser Festkörperproben im Vergleich; Quelle: (96), adaptiert

Wie aus Tabelle 58 ersichtlich ist, wurde der Blei-Silikatglasprobe (PbO-Glas1) - mit vergleichsweise hoher Quantenausbeute von QE von 16,6 % - der Referenzwert 100 % und der Polosiliziumprobe (Poly-Si) der Wert 0 % zugeordnet.

| Referenzprobe | Anregungswellenlänge [nm] | QE [%] |
|---------------|---------------------------|--------|
| PbO-Glas1 | 280 | 16,6 |
| Scheelit | 250 | 8,7 |
| Fluorit | 300 | 1,4 |

Tabelle 58: Absolute Quantenausbeute diverser Referenzmuster – Analysiert mit Lumineszenzspektrometer Quantaurus® von Fa. Hamamatsu durch die Service-Niederlassung von Fa. Hamamatsu in Deutschland

Aus der Tabelle 58 ergibt sich, dass die Quantenausbeute der Fluoritprobe um den Faktor 11,9 geringer ist als jene von Blei-Silikatglas. Abgeleitet aus den referenzierten

Intensitätswerten aus Abbildung 123 erhält man den Faktor 13,9. Zur einfachen Bestimmung der Größenordnung ist die entwickelte Methode demnach ausreichend.

8.3.4 Lebensdauer

Die entwickelte Methode zur Ermittlung der Lebensdauer bzw. Abklingzeit von Lumineszenzerscheinungen basiert auf der zeitlichen Abnahme des Intensitätsmaximums oder der Emissions-Peakfläche. Dazu werden mehrere Emissionsspektren der Probe im Fluoreszenz- und Phosphoreszenzmodus am LS 55 aufgenommen. Die Geräteeinstellungen sind bis auf den sogenannten „Delay“, der den zeitlichen Messabstand zwischen Anregungsimpuls und Phosphoreszenzmessung definiert, gleich. In Abbildung 124 sind dazu Ergebnisse für eine Scheelitprobe dargestellt. Der Delay wird im Abstand von 0,01 ms von Messung zu Messung erhöht, bis die relative Intensität null wird. Die Geräteeinstellungen für diese Messreihe sind ergänzend in Anhang L angeführt.

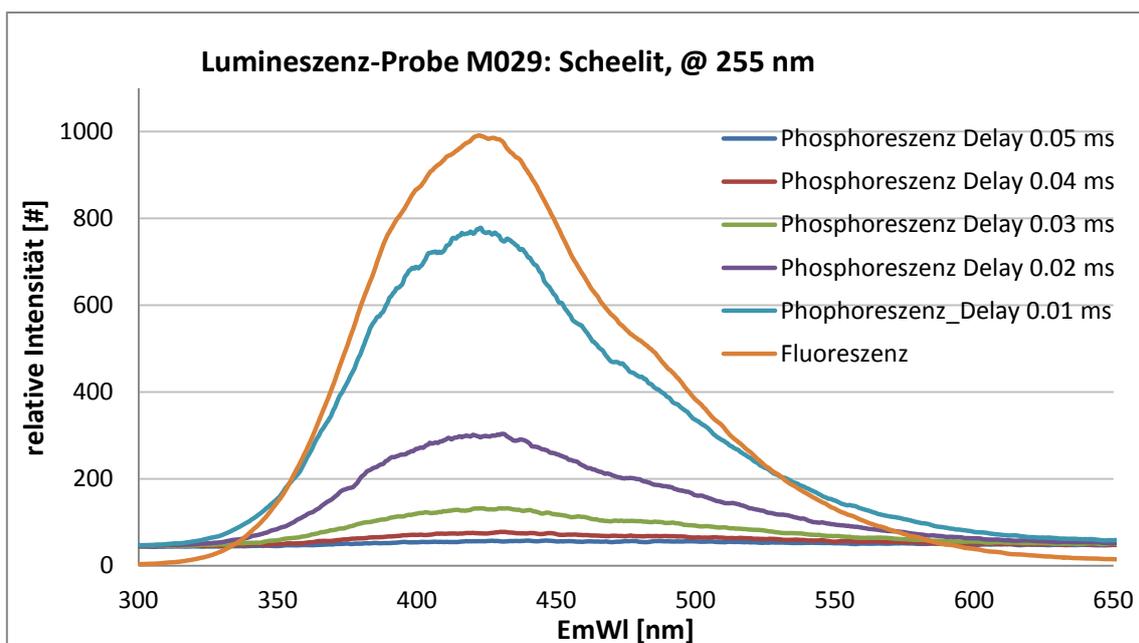


Abbildung 124: Gegenüberstellung der Lumineszenzspektren von Scheelit aus Rohgut M029 bei unterschiedlichen Messzeitpunkten

Aus den einzelnen Emissionsspektren werden die Intensitätsmaxima bzw. Peakflächen berechnet und über die Zeit, wie Abbildung 125 dargestellt, aufgetragen.

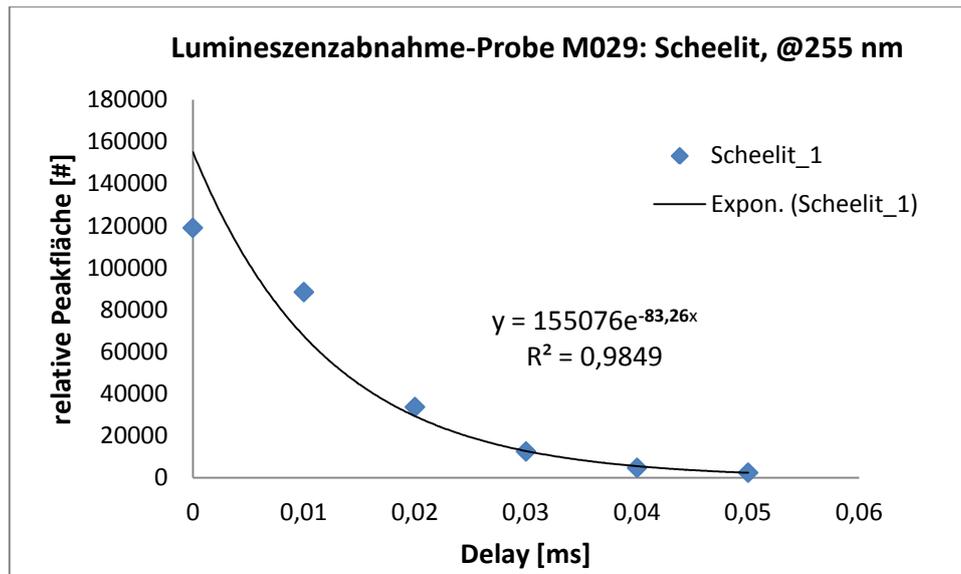


Abbildung 125: Zeitlicher Verlauf der Lumineszenz-Peakflächen von Scheelit aus Rohgut M029

In einem nächsten Schritt wird mittels geeigneter Software wie Excel® eine exponentielle Regression $f(x)$ entsprechend (8.1) durchgeführt.

$$y = f(x) = ae^{-kx} \quad (8.1)$$

Aus dem Faktor k im Exponenten der Regressionsgleichung kann nach (8.2) die Lebensdauer errechnet werden.

$$I_L = I_{L0}e^{-\frac{t}{\tau}} \rightarrow \ln \frac{I_L}{I_{L0}} = -\frac{t}{\tau} \rightarrow \tau \sim \frac{1}{k} \quad (8.2)$$

Für Scheelit ergibt sich nach dieser Methode demnach eine Lumineszenzlebensdauer τ von 12 μs . In der Größenordnung deckt sich dieser Wert mit Literaturwerten von 9 μs (106)

Angemerkt sei an dieser Stelle, dass auf Grund der Anforderungen bei der sensorgestützten Einzelkornsorrierung und technischer Restriktionen wie

- hoher Objektrate,
- hoher erforderlicher örtlicher und zeitlicher Auflösung,
- kontinuierliche Bestrahlung bzw. verhältnismäßig langer Impulsdauer und
- beschränkter Detektorempfindlichkeit sowie auch Rechenkapazität

die Lumineszenzlebensdauer als Klassifizierungsmerkmal aktuell nicht nutzbar ist und daher auch im Weiteren nicht näher betrachtet wird.

8.3.5 Spektrale Analysen von Fallbeispielen

8.3.5.1 Altglas

Die in Abbildung 126 fotografisch dargestellten ausgewählten Altglasscherben aus Kalknatron-Silikat (G1, G3, G9, G10, G12, G15), bleihaltigem Kalknatron-Silikat (G5) und Blei-Silikat (G2, G4, G11) sind bei Tageslicht (a, c) nicht oder lediglich geringfügig voneinander unterscheidbar. Eine farb-basierte Sortierung von Kalknatron bzw. normalem Hohlglas und Blei-Silikat ist daher, wie in Absatz 6.4.1.4 bereits erörtert, nicht zielführend.

| | | | | | |
|-------------------|---|---|---|--|---|
| (a) Tageslicht |  |  |  |  |  |
| (b) UV-Lampe @254 |  |  |  |  |  |
| | G1: Kalknatron-Silikat (MK1) | G2: Blei-Silikat (MK8) | G3: Kalknatron-Silikat (MK1) | G4: Blei-Silikat (MK8) | G5: bleiBlei-Silikat (MK8) |
| (c) Tageslicht |  |  |  |  |  |
| (d) UV-Lampe @254 |  |  |  |  |  |
| | G9: Kalknatron-Silikat (MK1) | G10: Kalknatron-Silikat (MK1) | G11: Blei-Silikat (MK8) | G12: Kalknatron-Silikat (MK1) | G15: Kalknatron-Silikat (MK1) |

Abbildung 126: Ausgewählte Glasscherbenproben unter Tages- und UV-Licht

Wie aus Abbildung 126 aber ebenfalls ersichtlich ist, emittieren die bleihaltigen Glasscherben (G2, G4, G5, G11) unter Bestrahlung von UVC-Licht (b, d) erwartungsgemäß blaues Lumineszenzlicht. Neben der durch PbO verursachten charakteristischen blauen

Lumineszenz sind auch andere Lumineszenzfarben (G1, G3, G9, G10 und G15) zu beobachten.

Aus der in Tabelle 59 ausgewiesenen qualitativen chemischen Zusammensetzungen³⁸ der einzelnen Proben können geringe Anteile an Kupfer (G10, G15), Antimon (G3) und Vanadium (G9) als mögliche Aktivatoren identifiziert werden. Ein Aktivator für die intensive grüne Lumineszenz von G1 kann aus den untersuchten Elementen nicht abgeleitet werden. Die Probe P12 zeigt keine Lumineszenz. Die chemische Zusammensetzung weist diese als normale Kalknatron-Silikatglasscherbe aus, die mit einem Anteil von über 95 % der Altglasscherben eine dominierende Stellung einnimmt.

| Probe | Pb | Ca | K | Ti | Zr | As | Sb | Zn | Cu | Co | Fe | Cr | V | Ba | Sr | Bal |
|-------|--------------|------|------|----|------|------|-------------|------|-------------|----|------|------|-------------|------|------|------|
| 1 | 0,01 | 5,33 | 0,45 | - | 0,00 | - | - | - | 0,09 | - | 0,12 | 0,04 | - | 1,39 | 0,05 | 92,4 |
| 2 | 15,64 | - | 8,69 | - | - | 1,24 | - | - | - | - | - | - | - | 1,20 | - | 72,9 |
| 3 | - | 6,15 | 7,30 | - | 0,01 | - | 0,17 | - | - | - | 0,07 | 0,02 | - | - | 0,01 | 86,2 |
| 4 | 13,81 | 0,40 | 9,29 | - | - | 1,28 | - | 0,17 | - | - | - | - | - | - | - | 74,9 |
| 5 | 0,42 | 7,53 | 1,20 | - | - | 0,09 | - | - | - | - | 0,08 | 0,03 | - | 1,47 | 0,21 | 88,9 |
| 9 | 0,02 | 8,98 | 0,42 | - | 0,02 | - | - | 0,01 | - | - | 0,11 | 0,02 | 0,12 | - | 0,05 | 90,1 |
| 10 | - | 8,43 | 0,75 | - | 0,01 | - | - | - | 0,20 | - | 0,11 | 0,02 | - | 0,02 | 0,06 | 90,3 |
| 11 | 11,30 | 2,44 | 6,48 | - | 0,12 | 0,74 | 0,14 | 0,07 | - | - | - | 0,03 | - | 0,84 | 2,91 | 74,7 |
| 12 | 0,01 | 8,70 | 0,48 | - | 0,01 | - | - | 0,01 | - | - | 0,12 | 0,02 | - | 0,04 | 0,09 | 90,4 |
| 15 | 0,00 | 4,20 | 3,26 | - | 0,03 | 0,27 | - | - | 0,49 | - | 0,17 | 0,02 | - | 0,35 | 0,05 | 91,0 |

Tabelle 59: Zusammensetzung relevanter Glasscherbenproben; Angaben in Gewichts-%

In Abbildung 127 sind die Lumineszenzspektren der Kalknatron-Silikatscherben im Vergleich zu einer repräsentativen Blei-Silikatscherbe G11 (Glas11) bei einer Anregungswellenlänge von 266 nm dargestellt³⁹. Die spektralen Verläufe decken sich gut mit dem visuellen Farbeindruck unter UVC-Licht. Anzumerken ist, dass die relative Lumineszenzintensität der Blei-Silikatglasscherbe bei gleichen Geräteeinstellungen dreimal höher ist bzw. außerhalb des Messbereichs von 1.000 a.u. liegt. Aus Darstellungsgründen wurden die Anregungs- und Emissionsspaltweiten, wie in der Legende angegeben, von 10 auf 7 nm reduziert.

³⁸ Analysiert mit RFA-Handspektrometer Niton XL3 der Fa. Thermo. Kalibriert auf die Detektion geringer Pb-Gehalte in Glasscherben

³⁹ Messmethode und -parameter wurden jeweils auf die proben-spezifische Lumineszenzart, wie Phosphoreszenz (PH) oder Fluoreszenz (FL), und die Darstellungsanforderung abgestimmt.

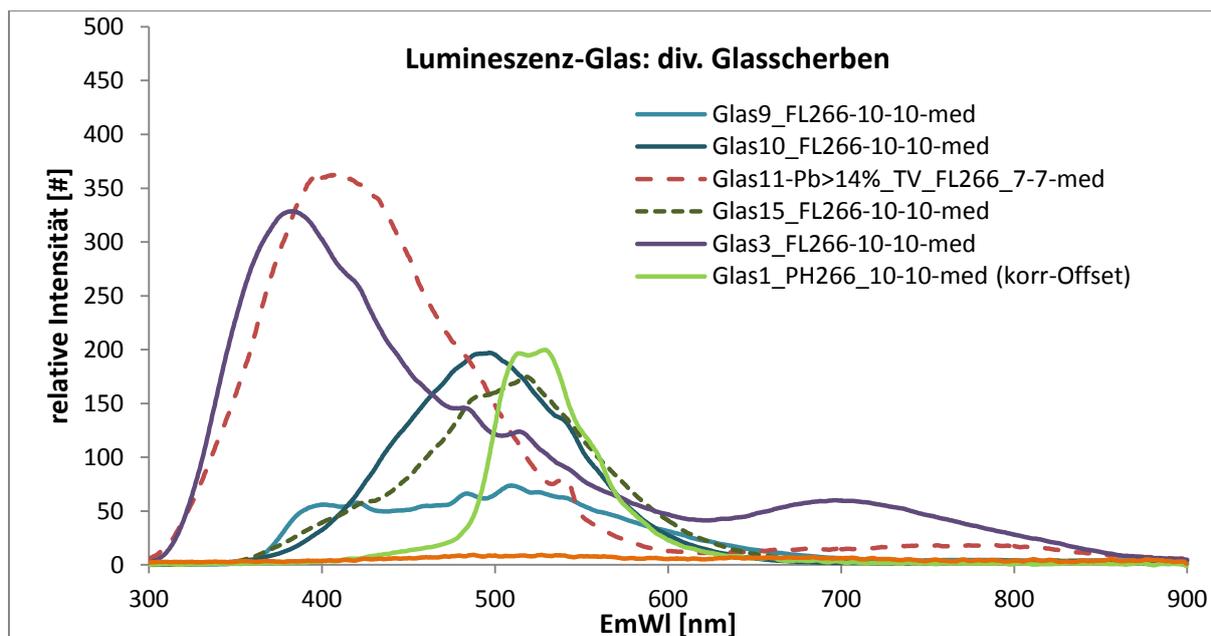


Abbildung 127: Lumineszenzspektren einer Blei- und diverser Kalknatron-Silikatscherben

Genauere Analysen des Spektrums der grün lumineszierenden Scherbe G1 (Glas1) lassen auf Uran als Aktivator schließen. Charakteristisch für $(\text{UO}_2)^{2+}$ ist ein identifizierter Tripelpeak bei 502, 521 und 544 nm (96).

In Abbildung 128 sind die Lumineszenzspektren der vier bleihaltigen Silikatglasscherben, welche mit identen Geräteeinstellungen aufgenommen wurden, dargestellt.

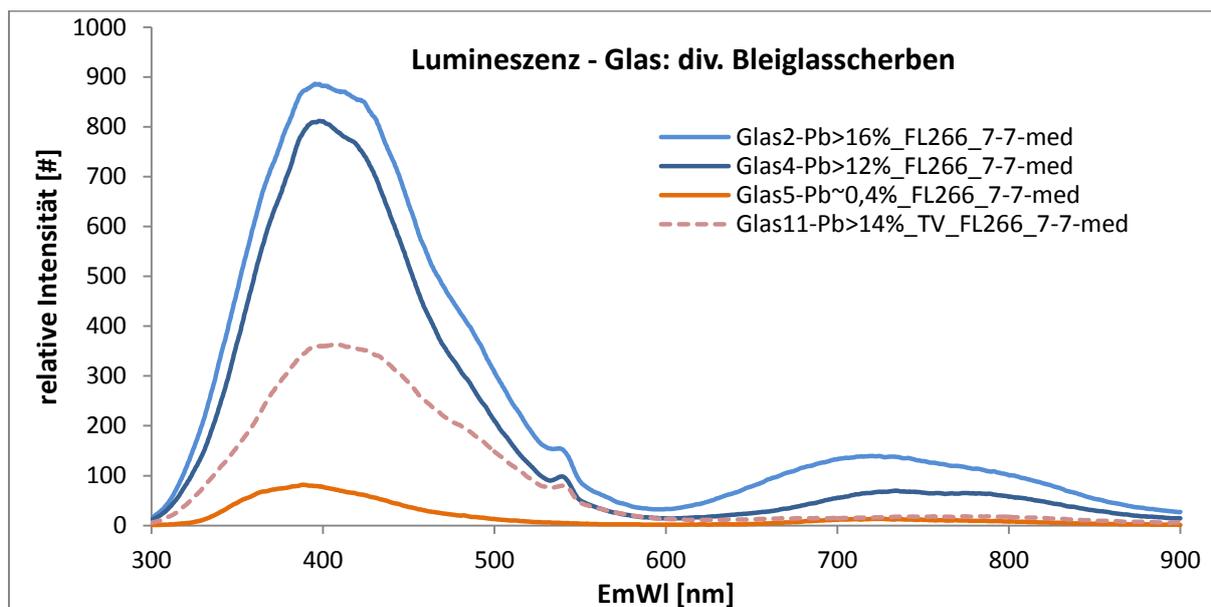


Abbildung 128: Gegenüberstellung von Lumineszenzspektren bleihaltiger Silikatglasscherben

Wie daraus ersichtlich ist, tritt bereits bei geringem PbO-Gehalt von unter 0,5 % die charakteristische Lumineszenz auf. Detaillierte Analysen an Schmelzproben ergaben eine steigende Lumineszenzintensität bei PbO-Gehalten zwischen 0,1 bis 2 %, welche bis zu hohen PbO-Gehalten von über 20 %, wie für Bleikristallglas typisch, annähernd gleich bleibt (35).

Aus den umfangreichen Analysen ergibt sich, dass die Lumineszenzeigenschaft von bleihaltigem Silikatglas und Blei-Silikatglas auf Grund

- der spezifischen und spektralen Charakteristik,
- hoher Intensität bzw. hohe Quantenausbeute und
- deren Aktivierung bereits ab sehr geringen PbO-Gehalt

gut geeignet ist zur Differenzierung gegenüber nicht bleihaltigem Kalknatron-Silikatglas.

8.3.5.2 Fluoritbruch - M045

Fluorit, von dem sich auch der Begriff „Fluoreszenz“ ableitet, ist ein verlässlich lumineszierendes Mineral. Seine Lumineszenzeigenschaft ist nicht intrinsisch, sondern gründet auf Gitterfehlern und/oder eingebauten Fremdionen. In Abbildung 129 sind dazu zur besseren Veranschaulichung die wesentlichen Merkmalsklassen einer Rohgutprobe aus der Türkei fotografisch unter Tageslicht und UVA-Bestrahlung dargestellt. Der Fluorit (MK1, MK2) ist überwiegend grün und violett gefärbt. Weißer Calcit (MK3) und verschieden gefärbte Tonminerale als Gangart ergänzen den Mineralbestand dieser Lagerstätte. Wie aus den Aufnahmen unter UVA-Licht ersichtlich ist, emittieren die Fluoritklassen blaues und der Calcit rotes Lumineszenzlicht. Die Tonminerale zeigen keine spezifische Lumineszenz. In Abbildung 130 ist ergänzend eine faustgroße verwachsene Probe unter Tages- und UVA-Licht dargestellt. Unter UVA-Licht sind die oberflächlichen Verwachsungsverhältnisse deutlich besser und im Detail erkennbar.

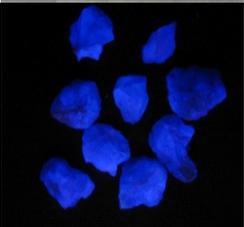
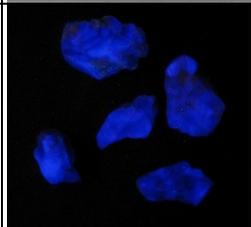
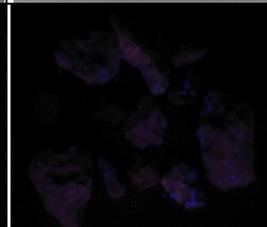
| | | | | |
|--------------|---|---|--|---|
| Tageslicht |  |  |  |  |
| UV-Lampe@366 |  |  |  |  |
| | MK1: Fluorit (CaF_2) - gebrochen, (hell) grün | MK2: Fluorit (CaF_2) - gebrochen, (hell) violett | MK3: Calcit (CaCO_3) - gebrochen, weiß | MK4: Gangart (Tonminerale) – gebrochen, verschieden gefärbt |

Abbildung 129: Merkmalsklassenobjekte unter Tages- und UV-Licht der Rohgutprobe M045

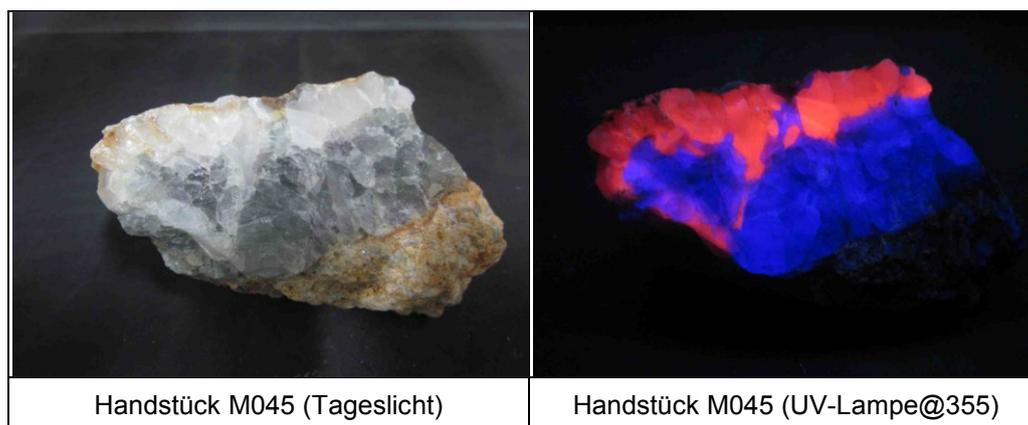


Abbildung 130: Etwa faustgroßes Handstück der Rohgutprobe M045 unter Tages- und UVA-Licht

In Abbildung 131 sind die spezifischen Lumineszenzspektren der Merkmalsklassen bei einer Anregungswellenlänge von 355 nm dargestellt. Die Intensitätsmaxima mit 425 nm und die Halbwertsbreiten mit 40 nm der beiden Fluoritklassen sind ident und haben Fluoreszenzcharakter bzw. sind kurzlebig ($\tau < 1$ ms). Diese charakteristische Fluoreszenz ist Eu^{2+} zuzuordnen (107).

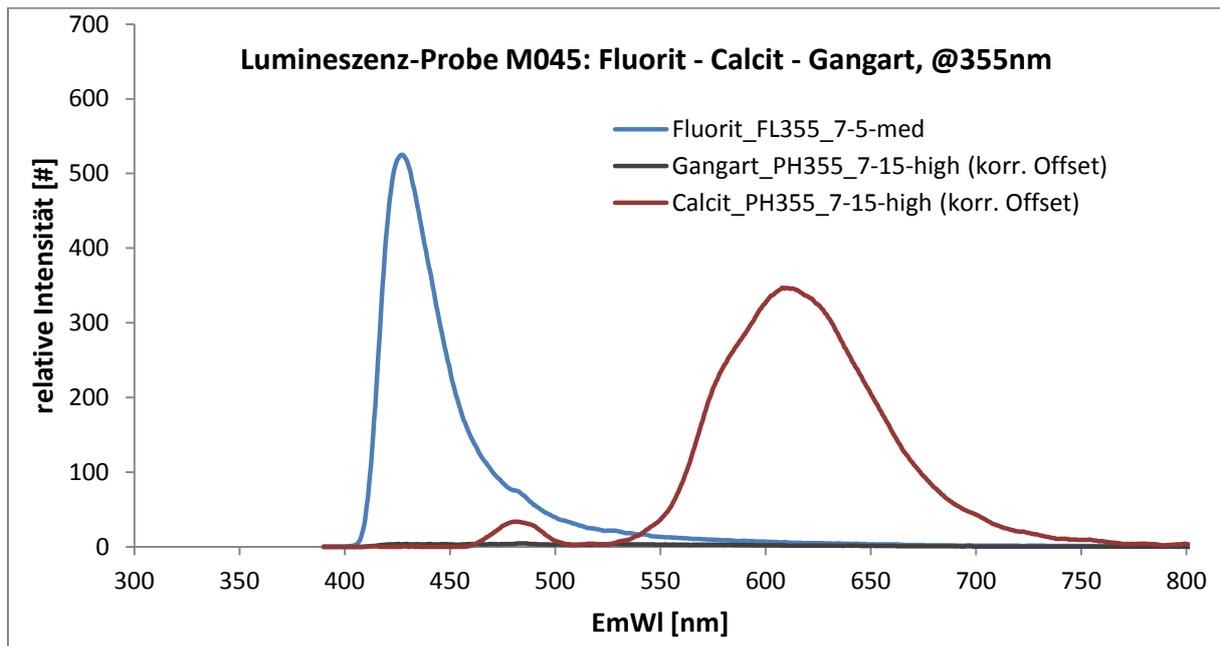


Abbildung 131: Gegenüberstellung von Lumineszenzspektren der Rohgutprobe M045

Im Vergleich dazu weist Calcit (rote Linie) zwei Emissionsbanden mit Phosphoreszenzcharakter auf. Der weniger intensive Peak mit Intensitätsmaximum bei 480 nm kann Dy^{3+} , der farbgebende Peak mit dem Intensitätsmaximum bei 620 nm kann Mn^{2+} zugeordnet werden (108). Die relative Lumineszenzintensität der Fluoritproben ist bei gleichen Geräteeinstellungen etwa 2 Mal höher als die der Mn^{2+} -Bande von Calcit. Aus Darstellungsgründen wurde bei der Fluoritvermessung die Emissionsspaltweite von 15 auf 5 nm reduziert.

8.3.5.3 Schwer-/Flussspatbruch - M002

In Abbildung 132 sind fotografisch die Merkmalsklassen eines Schwespatkonzentrats der Körnung 8/20 mm aus einer Lagerstätte und Aufbereitungsanlage aus Deutschland dargestellt. Neben Schwespat ist Flussspat bzw. Fluorit überwiegend noch als verwachsenes Begleitmineral vorhanden. Die weiß oder nur leicht gefärbten Merkmalsklassenobjekte sind bei Tageslicht schwer unterscheidbar, eine farb-basierte Sortierung daher nicht zielführend. Wie aus den Aufnahmen unter UVA-Licht ersichtlich, emittiert Fluorit (MK1) aus dieser Lagerstätte unter Bestrahlung von UVA-Licht wiederum intensives blaues Lumineszenzlicht. Der Schwespat (MK2) hingegen zeigt schwache Lumineszenz und/oder reflektiert lediglich den sichtbaren Anteil des Lampenlichts. Auch visuell gut identifizierbar sind Verwachsungen (MK1/2) unter UVA-Licht.

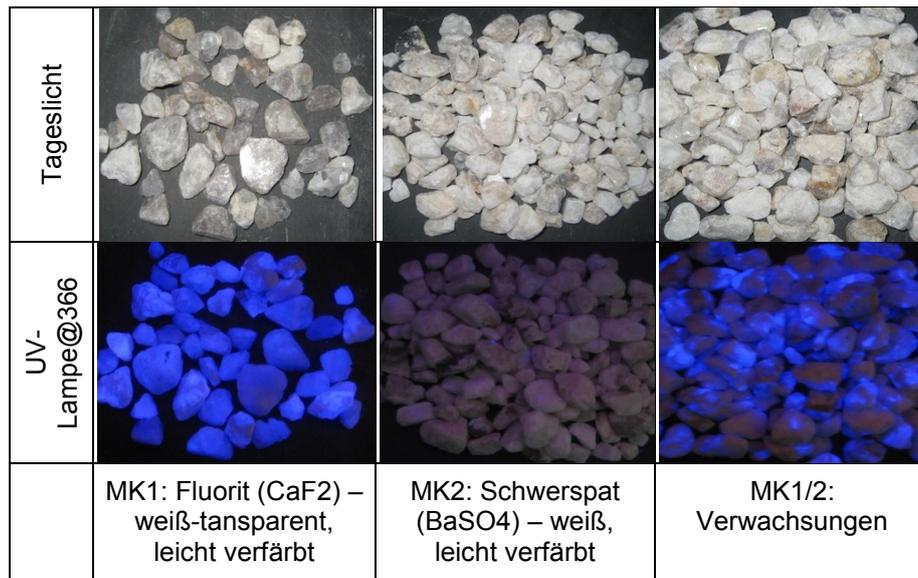


Abbildung 132: Merkmalsklassenobjekte unter Tages- und UV-Licht der Rohgutprobe M002

In Abbildung 133 sind die charakteristischen Lumineszenzspektren von Schwerspat und Fluorit bei einer Anregungswellenlänge von 366 nm dargestellt. Die spektrale Charakteristik dieser Fluoritart ist ähnlich bzw. ident mit der zuvor diskutierten aus der türkischen Lagerstätte M045. Der Schwerspat weist ähnlich dem Fluorit eine Emissionsbande bei 425 nm, aber mit deutlich geringerem Intensitätsmaximum, auf. Diese kann wiederum Eu^{2+} zugeordnet werden und überlagert sich mit einer sehr breiten Emissionsbande mit einem Intensitätsmaximum bei 485 nm, deren Aktivator aus der Literatur nicht bestimmt werden konnte. Gangartmaterial, wie Quarz oder Beton, weist keine messbare Lumineszenz auf.

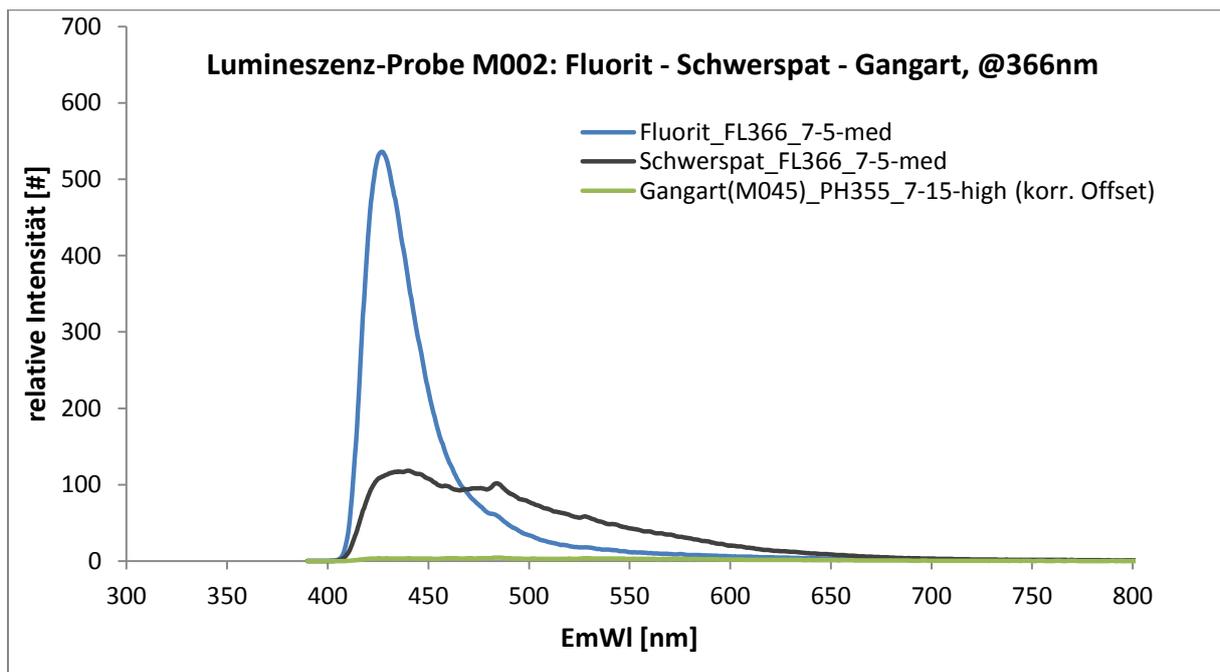


Abbildung 133: Gegenüberstellung von Lumineszenzspektren der Rohgutprobe M002

8.3.5.4 Scheelit - M029

Scheelit ist ein wichtiges Wolframerz und sieht unter Tageslicht, wie aus Abbildung 134 ersichtlich ist, sehr unscheinbar aus. Die dargestellten Proben stammen aus einer österreichischen Lagerstätte und sind in scheelithaltige Körner (MK1) und Gangart ohne Scheelitverwachsungen (MK2) aufgeteilt. Scheelit ist eines der wenigen Minerale mit intrinsischer Lumineszenzeigenschaft, daher wird diese Eigenschaft auch bei der Prospektion als Bestimmungshilfe genutzt. Wie aus den Aufnahmen unter UVC-Bestrahlung ersichtlich ist, emittiert der Scheelit intensives bläulich-weißes Lumineszenzlicht. Die Gangart zeigt keine spezifische Lumineszenz. Auch kleinste oberflächliche Verwachsungen und Scheeliteinschlüsse sind unter UVC-Licht gut erkennbar.

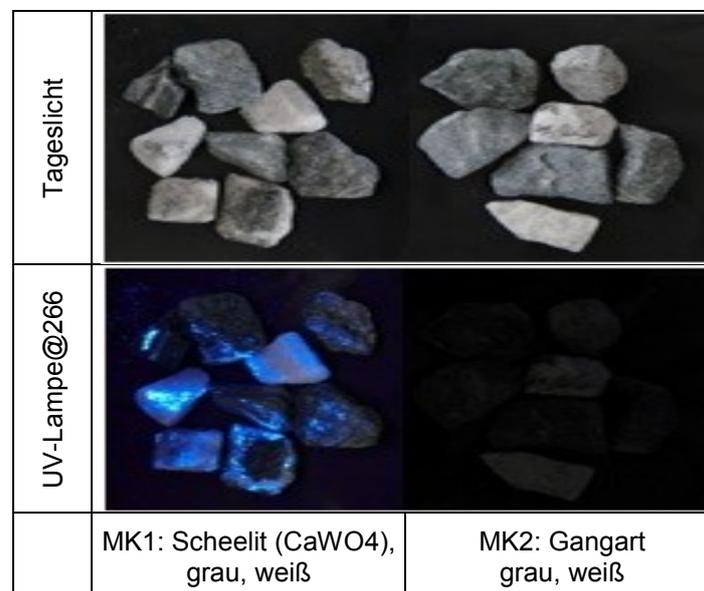


Abbildung 134: Merkmalsklassenobjekte unter Tages- und UV-Licht der Rohgutprobe M029

In Abbildung 135 sind die charakteristischen Lumineszenzspektren von Scheelit und dem Gangartgestein bei einer Anregungswellenlänge von 266 nm dargestellt. Die spektrale Charakteristik des Scheelits ist geprägt durch eine sehr breite Emissionsbande des Wolframoxidions WO_4^{2+} . Das Intensitätsmaximum liegt bei 425 nm, die Halbwertsbreite beträgt 160 nm. Zudem ist eine leichte Schulter bei 485 nm zu erkennen. Diese könnte durch eine überlagerte Emissionsbande von Dy^{3+} verursacht sein. Ein für Dysprosium typische zweite Emissionsbande bei 575 nm ist im abgebildeten Spektrum nicht erkennbar (106). Genauere spektrale Analysen an Pulverproben erhärten aber die zuvor geäußerte Vermutung.

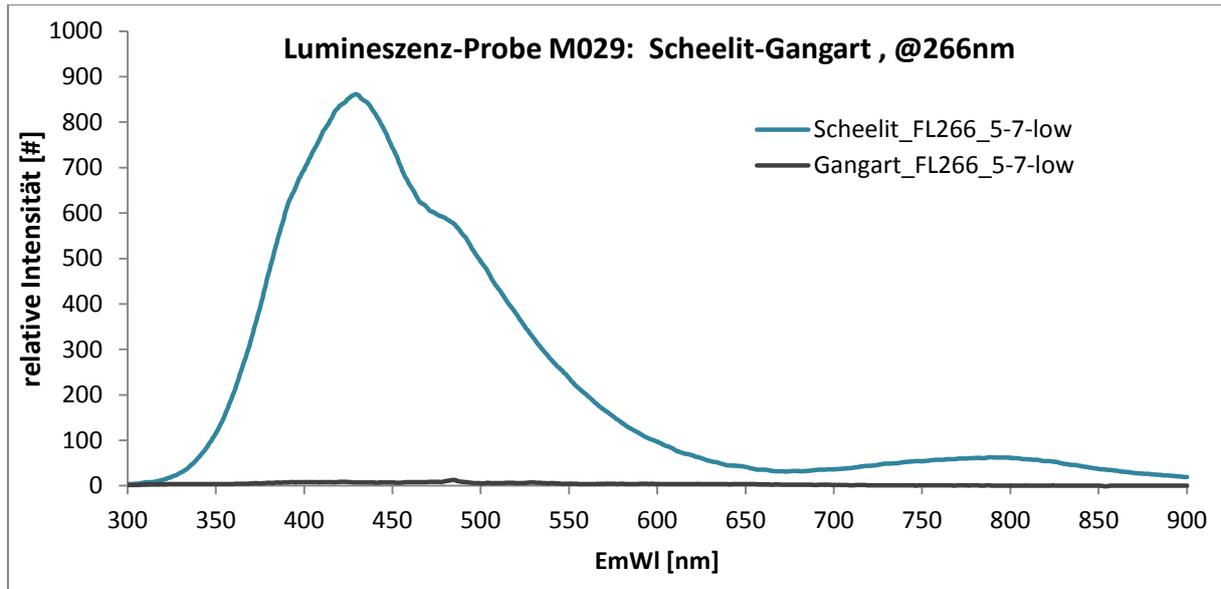


Abbildung 135: Gegenüberstellung von Lumineszenzspektren der Rohgutprobe M029

8.3.5.5 Kalksteinbruch - M001

Die Reflexionseigenschaften von Rohgut M001, insbesondere jene im NIR-Bereich, wurden bereits in 8.1.1.2 diskutiert. Ergänzend dazu soll nun die Fluoreszenzeigenschaft behandelt werden. In Abbildung 136 sind nochmals die Kalksteinmuster (MK1 – MK3), welche sich in Bezug auf den Ca^{2+} -Gehalt bzw. Mg^{2+} -Gehalt unterscheiden, fotografisch dargestellt.

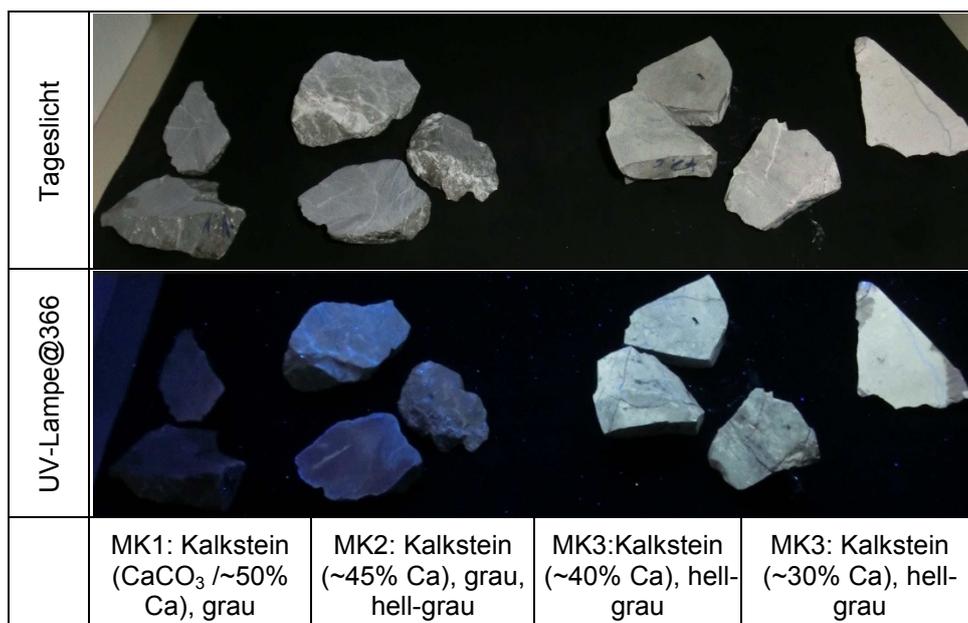


Abbildung 136: Merkmalsklassenobjekte unter Tages- und UV-Licht der Rohgutprobe M001 - Ca-Gehalt gemessen mit RFA-Handspektrometer Niton XL3 der Fa. Thermo

Wie aus den ergänzten Aufnahmen unter Bestrahlung von UVA-Licht ersichtlich ist, emittieren die Kalksteinproben mit hohem Mg^{2+} -Gehalt weiß-gelbes Lumineszenzlicht. Die Intensität dieser Emission sinkt tendenziell mit steigendem Ca^{2+} -Gehalt.

In Abbildung 137 sind die charakteristischen Lumineszenzspektren der Merkmalsklassen bei einer Anregungswellenlänge von 366 nm dargestellt. Die Charakteristik aller vier Spektren ist geprägt durch eine sehr breite Emissionsbande mit einem Intensitätsmaximum bei 520 nm und zwei gut erkennbaren Schultern bei 430 und 480 nm. Die Halbwertsbreite beträgt 155 nm. Die erste Schulter bei 430 nm kann angeregtem CO_3^{2-} , die Schulter bei 480 nm Pr^{3+} (Praseodym) und das Intensitätsmaximum bei 520 nm der Emission nach Rekombination eines Exzitons - dem sogenannten „self trapped“ - Phänomen - zugeordnet werden (109), (110).

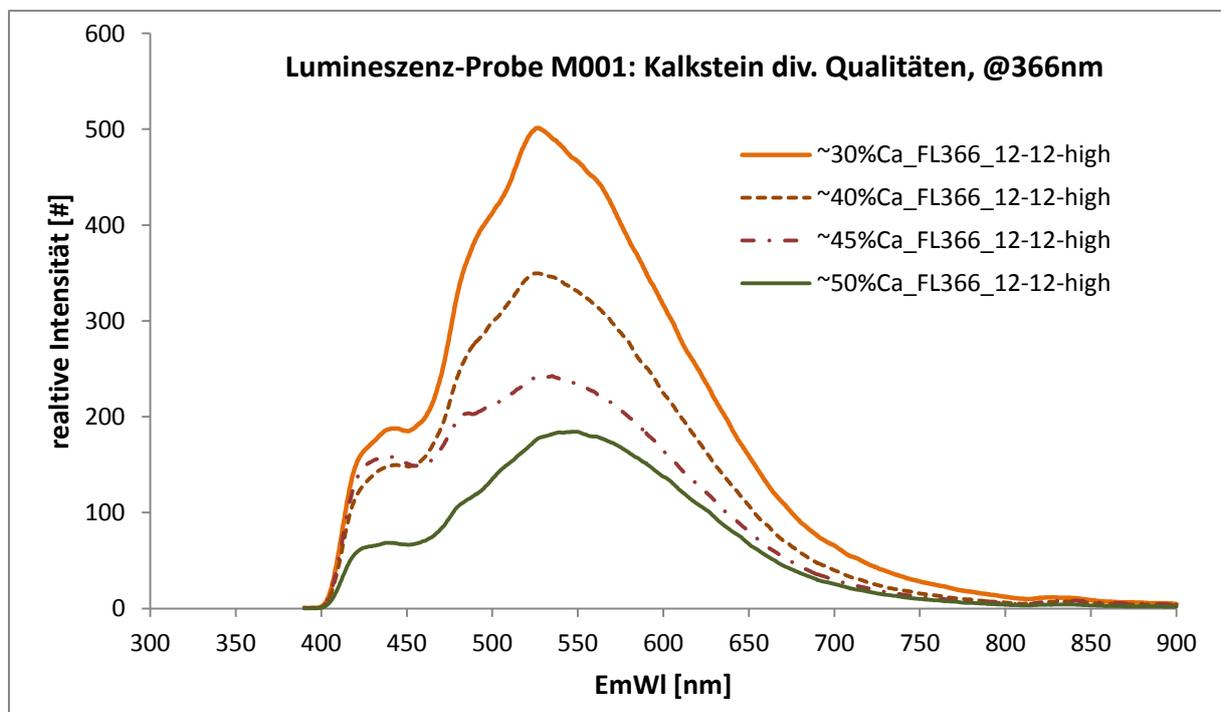


Abbildung 137: Gegenüberstellung von Lumineszenzspektren der Rohgutprobe M001

Der tendenziell beobachtete direkte Zusammenhang zwischen Lumineszenzintensität und Ca^{2+} -Gehalt bestätigte sich. Sowohl das relative Intensitätsmaximum, als auch die gesamte Emissionsstrahlungsleistung korrelieren gut mit der analysierten chemischen Zusammensetzung. Eine fluoreszenz-basierte Klassifizierung erscheint im Vergleich zur bereits diskutierten NIR-basierten sogar geeigneter und robuster. Insbesondere deshalb, weil oberflächlich anhaftendes Wasser die Lumineszenz kaum bzw. nicht beeinflusst.

8.3.5.6 Magnesitbruch - M010

Wie für den zuvor diskutierten Kalksteinbruch M001 wurden die Reflexionseigenschaften im NIR-Bereich auch für den Magnesitbruch M010 im Kapitel 8.1 diskutiert und sollen dazu ergänzend ebenfalls die relevanten Lumineszenzeigenschaften erörtert werden. Die in Abbildung 138 fotografisch dargestellten Magnesit- (MK1) und Chalzedonproben (MK6) unterscheiden sich farblich wenig bzw. nicht. Chalzedon aus dieser Lagerstätte emittiert unter UVC-Licht überwiegend grünes oder grün-gelbes Lumineszenzlicht. Ein geringer Anteil - hier nicht dargestellt - luminesziert blau. Magnesit (MK1) luminesziert vergleichsweise schwach in einem bläulich-grauen Farbton.

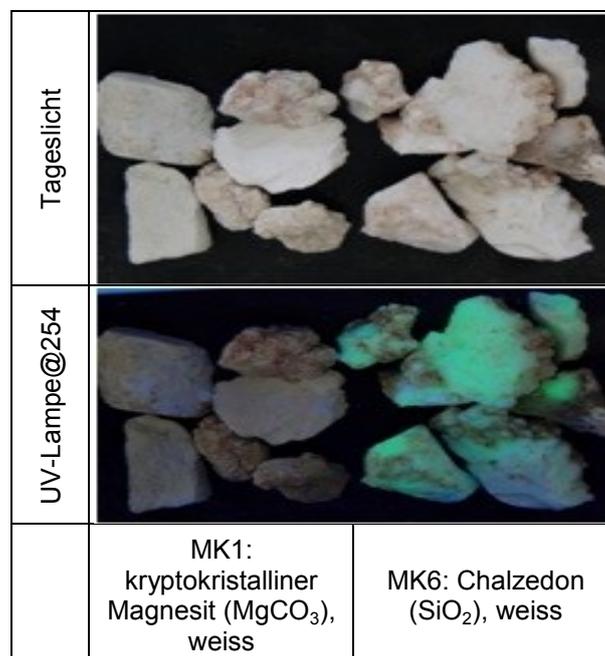


Abbildung 138: Relevante Merkmalsklassenobjekte unter Tages- und UV-Licht der Rohgutprobe M010

In Abbildung 139 sind die charakteristischen Lumineszenzspektren der beiden Merkmalsklassen bei einer Anregungswellenlänge von 254 nm dargestellt. Die spektrale Charakteristik des Chalzedons ist geprägt durch Emissionspeaks bei ca. 500 und 520 nm und einer Schulter bei 550 nm. Eine sehr ähnliche Charakteristik wurde bereits bei der Glasprobe G1 in 8.3.5.1 identifiziert und kann UO_2^{2+} zugeordnet werden. Diese unterstreicht die intrinsische Lumineszenzeigenschaft von Uran (40). Das relative Intensitätsmaximum der Magnesitlumineszenz ist vergleichsweise klein und liegt bei etwa 430 nm und kann wiederum angeregtem CO_3^{2-} zugeordnet werden. Ein weiterer Peak, der auf Grund der Diagrammskalierung aber kaum erkennbar ist, liegt bei etwa 480 nm und kann vermutlich Pr^{3+} zugeordnet werden.

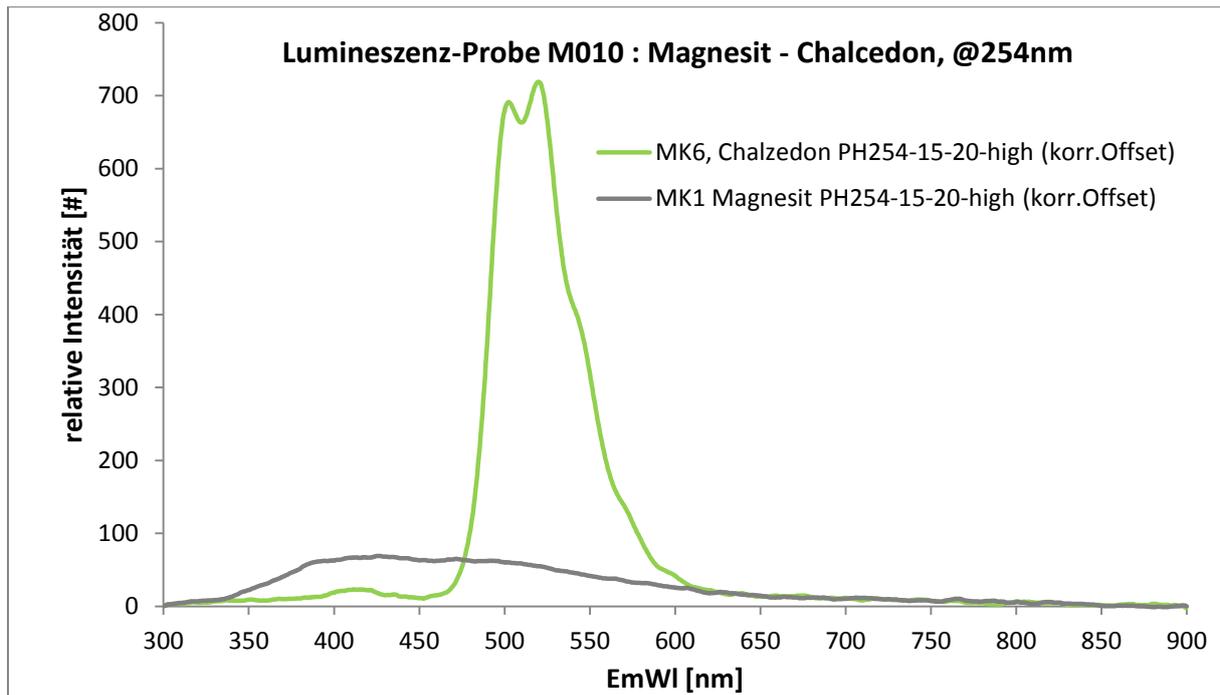


Abbildung 139: Gegenüberstellung von Lumineszenzspektren der Rohgutprobe M010

Sowohl die fluoreszenz-basierte, als auch die bereits diskutierten NIR-basierten Klassifizierungen scheinen in Hinblick auf eine sensorgestützte Sortierung von Chalzedon grundsätzlich geeignet zu sein.

8.3.5.7 Rohrubine/Korund - M115

Zu Beginn dieses Jahrtausends wurde eine sehr große Rubin- und Korundlagerstätte in Mozambique entdeckt und vor wenigen Jahren in Verhieb genommen. Es handelt sich dabei um eine vor etwa 3 Millionen Jahren entstandene Seifenlagerstätte. Rohrubine (MK1) und Korunde (MK2), wie in Abbildung 140 fotografisch dargestellt, sind in geringer Konzentration in einer Mischung aus Quarzsand und -schotter (MK3) sowie anderen sehr feinkörnigen Sedimenten - mit einem Gehalt von ca. 0,01 % - eingebettet. Mittels Nassaufbereitung erfolgen das Freilegen und die Vorkonzentration einen Gehalt von ca. 0,5 %

Überwiegend Korunde, aber auch dunkel gefärbte hochwertige Rubine, überlappen sich farblich stark mit der Gangart. Die Gangart besteht im Wesentlichen aus durch Eiseneinlagerung verfärbtem Quarz. Die Lumineszenzeigenschaft von Rubin ist allgemein bekannt. Die theoretischen Grundlagen dazu wurden in 4.4.4 bereits detailliert erörtert. Unter UVA-Licht, wie aus Abbildung 140 ersichtlich, emittieren sowohl Rubine als auch Korunde das typisch rote Lumineszenzlicht. Die Gangart weist keine merkliche Lumineszenz auf.

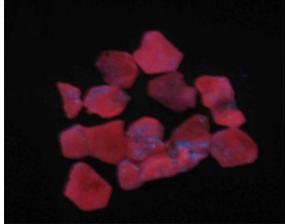
| | | | |
|--------------|--|---|--|
| Tageslicht |  |  |  |
| UV-Lampe@366 |  |  |  |
| | MK1: Rubin ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$) – rot, rosa, braun-rot | MK2: Korund ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$) – rot, rosa, braun | MK3: Gangart [Quarz (SiO_2 , ...) – verschieden gefärbt |

Abbildung 140: Merkmalsklassenobjekte unter Tages- und UV-Licht der Rohgutprobe M115

Die Gegenüberstellung der Lumineszenzspektren - bei einer Anregungswellenlänge von 550 nm – von qualitativ unterschiedlichen Rubinproben, Korund und Gangart bestätigt diesen visuellen Eindruck. Die Spektren der Wertmineralproben, welche in Abbildung 141 dargestellt sind, sind geprägt durch die sehr intensive und schmale Emissionsbande bei 693 nm. Diese ist dem eingelagerten dreiwertigen Chrom (Cr^{3+}) zuzuordnen. Bei der Gangart tritt tatsächlich keine messbare Lumineszenz auf. Dabei wirken die eingebauten Eisenionen sehr wahrscheinlich auch als Quencher.

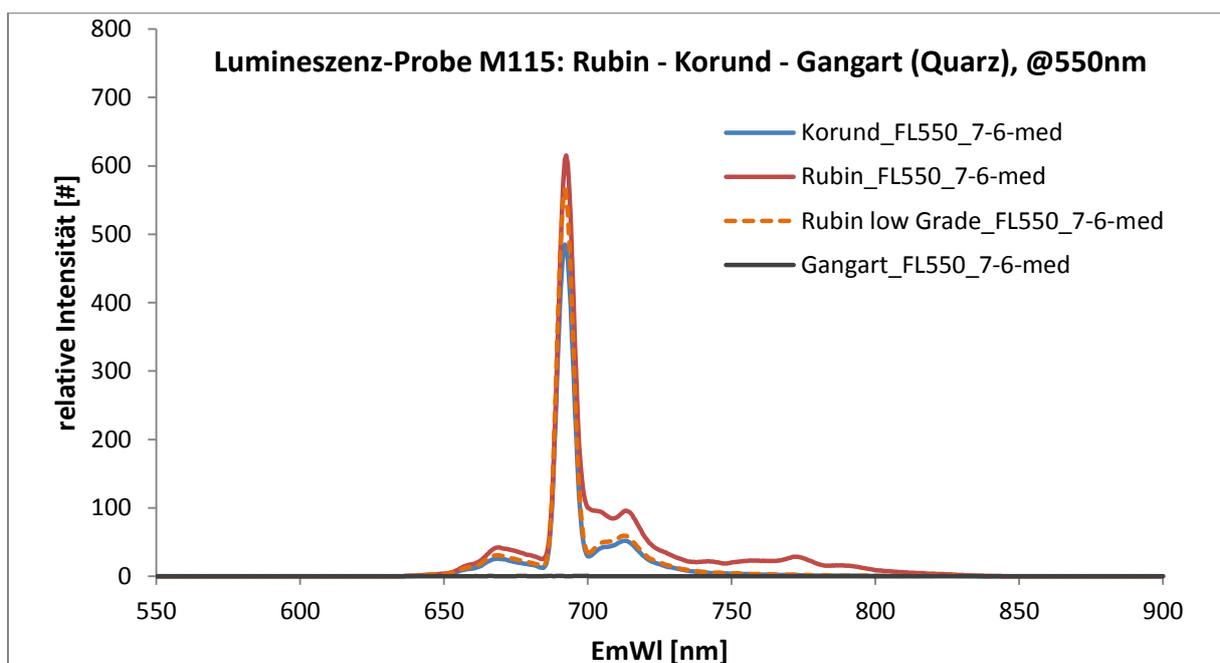


Abbildung 141: Gegenüberstellung von Lumineszenzspektren der Probe M115

Für eine lumineszenz-basierte Klassifizierung sind ideale Voraussetzungen gegeben, insbesondere da auch kleine - nur millimetergroße - Wertmineralpartikel (MK1, MK2) unter UV-Licht intensiv lumineszieren und identifiziert werden können.

8.3.6 Fazit zur lumineszenz-basierten Klassifizierung

Es wurde eine Vielzahl an Rohgutproben bzw. Merkmalsklassen bezüglich ihrer Lumineszenzeigenschaften untersucht. Von etwa 100 analysierten, überwiegend mineralischen Rohgut- und Zwischenproduktproben aus aller Welt weisen etwa 15 % nutzbare Lumineszenzeigenschaften auf. Aus den Ergebnissen lässt sich die starke Abhängigkeit von der Lagerstättengenese auf diese bestätigen. Neben den fehlenden grundlegenden elementaren Strukturvoraussetzungen verhindern oftmals eingelagerte sogenannte „Quencher“ wie Fe-Ionen Lumineszenzerscheinungen.

Sofern Lumineszenzeigenschaften gegeben waren, wurden als wesentliche Klassifizierungsparameter die Anregungs- und Emissionswellenlängenbereiche identifiziert.

In Bezug auf die Altglassortierung ergibt sich, dass die Lumineszenzeigenschaft von Blei-Silikatglas auf Grund der spezifischen spektralen Charakteristik sehr gut geeignet ist zur Differenzierung gegenüber nicht bleihaltigem Kalknatron-Silikatglas. Blei-Silikatglas weist zudem eine vergleichsweise hohe Quantenausbeute QE von ca. 16 % auf, welche eine Aktivierung der Lumineszenz bereits ab sehr geringen PbO-Gehalten ermöglicht.

Eine lumineszenz-basierte Klassifizierung erscheint, insbesondere für die Erkennung von verwachsenen bzw. nicht vollständig aufgeschlossenen Partikeln und sehr feinkörnigen Fraktionen, gut geeignet für den Einsatz in der sensorgestützten Sortierung. Eine entsprechend hohe örtliche Auflösung der Sensorik und Empfindlichkeit ist dafür erforderlich. Da die Quantenausbeute zumeist nur wenige Prozent beträgt, muss die Bestrahlungsstärke sehr hoch sein.

9 Neuentwickelte Sensoriken

Der weiterentwickelte Machbarkeits- und Konzeptionierungsprozess, wie in Kapitel 7 dargestellt, wird nunmehr seit einiger Zeit systematisch angewendet und ist Basis für die Eignungsprüfung des Standardportfolios sowie der Weiterentwicklung der sensorgestützten Sortiertechnik der Binder+Co AG. Neben der bereits in Kapitel 6 erörterten Weiterentwicklungen der farb-basierten Sortiertechnik, wie der kombinierten Auf-Durchlichtdetektion oder der doppelseitigen Detektion, wurden im Sinne des Forschungsprojektes alternative Sensoriken, welche über den VIS-Bereich hinaus aktiv sind, entwickelt. Dies erfolgte in enger Zusammenarbeit mit industrienahen Entwicklungspartnern und spezialisierten Lieferanten, wie IOSB Fraunhofer, EVK DI Kerschhaggl GmbH, Joanneum Research oder Hamamatsu Photonics. In diesem Kapitel werden entwickelte industrietaugliche Sensoriken behandelt. Im Fokus stehen dabei erfinderische bzw. patentierte UV/VIS-basierte Sensoriken. Der Vollständigkeit halber wird am Beginn kurz auch auf eine NIR-basierte Sensoriklösung, welche insbesondere für mineralische Rohstoffe relevant ist, eingegangen.

9.1 NIR-basierte Sensoriken

Wie an Hand, der in Kapitel 8.1 diskutierten Beispiele gezeigt werden konnte, weisen viele aufzubereitende mineralische Rohgutarten verschiedene und nutzbare Unterscheidungsmerkmale im NIR-Bereich auf. Die Nutzung stellt allerdings erhebliche Anforderungen an die sensorische Empfindlichkeit, das Signal-Rauschverhältnis und die spektrale sowie örtliche Auflösung der industriellen Sensoren. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden im Vergleich zu anderen NIR-Sensorlösungen örtlich und spektral hochauflösende NIR-Sensoriken vom Typ „Hyper Spectral Imaging“ entwickelt und in Sortiersysteme integriert. Die zu Grunde liegende Detektortechnik und wesentliche Funktionsdaten sind in der entsprechenden Technologieübersicht unter 5.3.2.2 angeführt. Das aus der Entwicklung abgeleitete NIR-Reflexion-System für die Sortierung von mineralischen Rohstoffen ist mit spektralen Arbeitsbereichen von 900 bis 1.700 nm oder 1.200 bis 2.200 nm verfügbar. Das entsprechende Konzeptschema dazu ist in Abbildung 142 dargestellt. Die hohe örtliche Abbildungsauflösung von 5 x 1,7 mm, eine spektrale Auflösung von ca. 3 nm und eine rechenzeitoptimierte Datenverarbeitungs- bzw. Klassifizierungssoftware ermöglichen insbesondere die diffizile Sortierung verwachsener mineralischen Rohstofffraktionen.

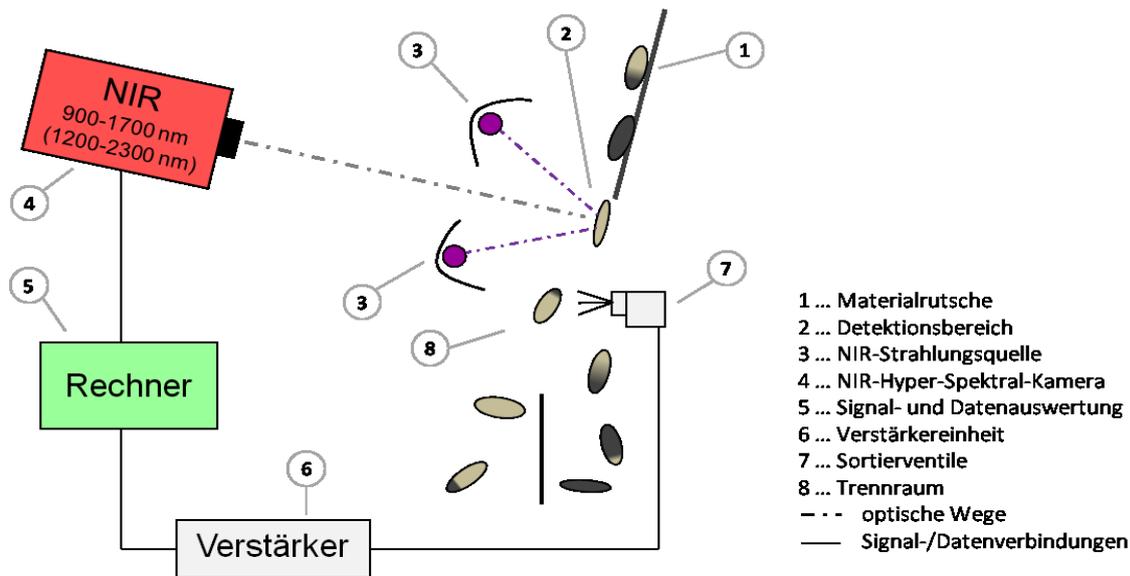


Abbildung 142: Konzeptschema es hochauflösenden NIR-Reflexions-Systems beispielsweise zur Talk-Sortierung

Als praktisches Beispiel sei auf einen realisierten Einsatz in einer chinesischen Talkaufbereitungsanlage, welche auf den in 8.1.1.4 diskutierten Spektralanalysen basiert, verwiesen. Sowohl die Untersuchungen im Labormaßstab als auch die Realisierung des Projekts zeigen eindeutig, dass die NIR-basierte Sortierung in diesem Fall erfolgreich für Korngrößenklassen > 7 mm eingesetzt werden kann. Die Auswertung einer als umfassend zu bewertenden Anlagenbeprobung hat den gewählten kaskadierten Trennprozess – der aus drei Rutschensortierern und einer Rückführung der Verwachsungen über eine Brechstufe besteht - hinsichtlich Durchsatzleistung, Produktqualität und Trenngrad der einzelnen Sortierer bestätigt. Der Korngrößenbereich < 7 mm kann aktuell nicht sensorgestützt sortiert werden. Dies gründet einerseits auf der im Vergleich zu VIS-Sensoren noch begrenzten Auflösung und andererseits auf den ungünstigen Transporteigenschaften der Körner, insbesondere auf der Rutsche im Sortierer. In Realisierung befindet sich zurzeit eine Flotationsanlage für die auf $< 0,5$ mm gemahlene Korngrößenklasse < 7 mm und so ergänzen sich ein klassisches Trennverfahren und sensorgestützte Sortierung im Sinne einer technisch und ökonomischen Anlagenlösung. Zur Kapazitätssteigerung wird auch die sensorgestützte Sortierung bis Ende 2016 weiter ausgebaut werden (13),(52).

9.2 UV-basierte Sensoriken

Aus den im vorigen Kapitel 8 dargestellten spektralen Analyseergebnissen hat sich insbesondere die Nutzung des UV-Wellenlängenbereiches als alternativer Lösungsansatz zu röntgen- oder NIR-basierten Techniken, heraus kristallisiert. Berücksichtigt man die möglichen Trennaufgaben beim Einsatz in der Altglas- und/oder Mineralaufbereitung, die

industriellen Einsatzbedingungen und die Zielsetzung, mehrere spezifische spektrale Eigenschaften zu nutzen, ergaben sich für die Entwicklung von UV-basierten Sensoriken zusammengefasst folgende wesentlichen Aspekte und Anforderungen:

- hohe örtliche und zeitliche Detektorauflösung (Erkennung von Verwachsungen, Korngrößenbereich 1 bis 100 mm)
- spektraler Arbeitsbereich der Strahlungsquellen und Detektoren von 200 bis 800 nm
- ergänzende Farbdetektion (UV-Absorptionskante abhängig von der Glasfarbe, Sortierung farb-basiert oder basierend auf kombinierten optischen Eigenschaften)
- kombinierte Attributermittlung (variierende Trennaufgaben, Sortierung basierend auf kombinierten Eigenschaften)
- Objekt- und Szeneerkennung (positions- und sceneabhängige Sortierventilansteuerung, Clusterbewertung bzw. Identifikation von sich berührenden Objekten)
- rechenzeitoptimierte Programmstruktur und Bilddatenverarbeitungsalgorithmen (Klassifikation von bis zu 500.000 Objekten je Minute und Meter)
- anpassungsfähige Hardware und einfache Parametrierung (variierende spektrale Merkmalsklasseneigenschaften und Trennaufgaben)
- kompakte und kompatible Bauform (Nachrüstung von bereits installierten Maschinen)
- hohe Lebensdauer der Komponenten (hohe Verfügbarkeit und geringer Serviceaufwand bzw. -kosten)

Zudem ist bei lumineszenz-basierten Sensoriken auf Grund der zumeist geringen Quantenausbeute bzw. Lumineszenzintensität eine

- hohe Bestrahlungsstärke bei unterschiedlichen Anregungswellenlängenbereichen und
- sehr hohe Detektorempfindlichkeit

erforderlich.

9.2.1 Grundlegendes Lösungskonzept

Bei der Lösungsfindung wurden in der Konzeptionierungsphase Methoden aus der Theorie des erfinderischen Problemlösens bzw. TRIZ - wie Wertanalyse, Widerspruchsmatrix, Innovationsprinzipien oder grundlegende Entwicklungstrends - genutzt und der Kunden- bzw. Einsatznutzen dem Herstellernutzen gegenübergestellt. Unter Berücksichtigung der im vorigen Absatz aufgelisteten Aspekte und recherchierter bzw. verfügbarer Detektoren wurde ein grundlegender Lösungsansatz basierend auf einer Sensor- bzw. Datenfusion gewählt und spezifische Serienvarianten entwickelt. Eine vereinfachte Konzeptskizze der zu Grunde liegenden Datenverarbeitungsstruktur mit zwei Bilddatensensoriken ist dazu in Abbildung 143 dargestellt.

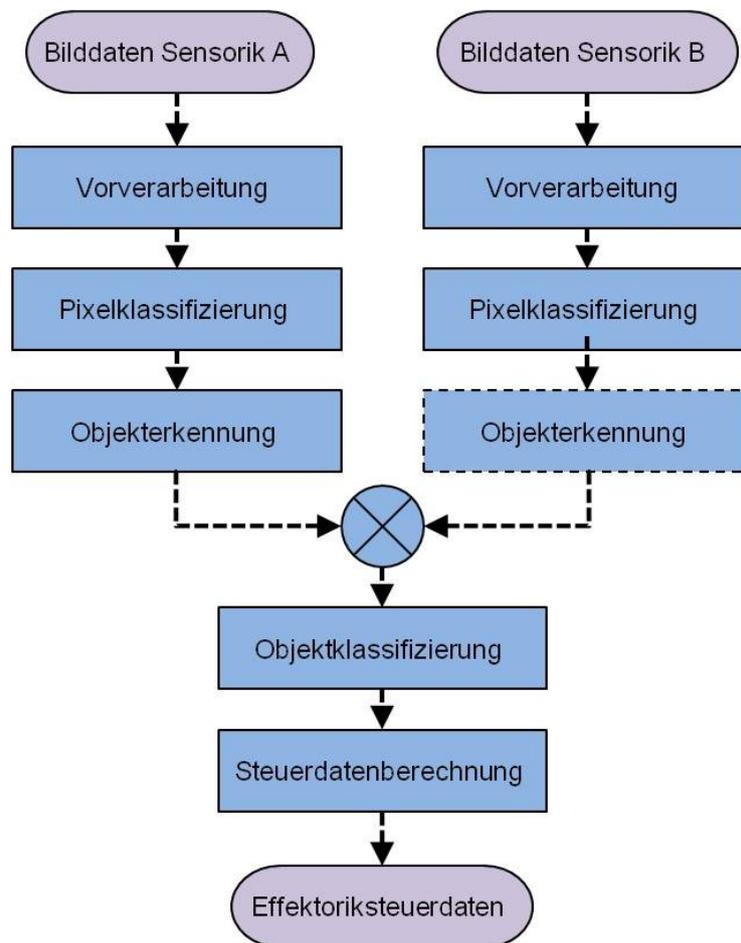


Abbildung 143: Konzept und Datenverarbeitungsstruktur der Sensorfusion

Die Sensorik (A) ist detektionstechnisch derart gestaltet, dass für jedes Objekt zumindest die Lage, Größe und Kontur sowie Distanz zu benachbarten Objekten - als Basis für eine Objekt- und Szenenbewertung - ermittelt werden kann. Die zweite Sensorik (B) ist geeignet, UV-Licht oder Lumineszenzemission zu detektieren. Die Bilddaten der beiden Sensoriken bzw. Zeilendetektoren sind zeitlich über ein Taktsignal und örtlich mittels Pixelkalibrierung

synchronisiert. Sie werden getrennt und kontinuierlich über speziell entwickelte Framegrabber übertragen, vorverarbeitet und es erfolgt eine separate pixel-basierte Klassifizierung in Abhängigkeit der Detektionsfunktion. Anschließend erfolgt eine Datenfusion, wobei mittels funktionsabhängiger Algorithmen einfache (A oder B) und/oder kombinierte Objektattribute (A und B) ermittelt werden. In Abhängigkeit der Parametrierung und Trennaufgabe erfolgt die Objektklassifizierung und Steuerdatenberechnung. Die Signal- und Datenverarbeitung ist bei derartigen Systemen sehr komplex und stellt hohe Anforderungen an die Ablaufsynchronisation, Rechenleistung und Softwarestruktur.

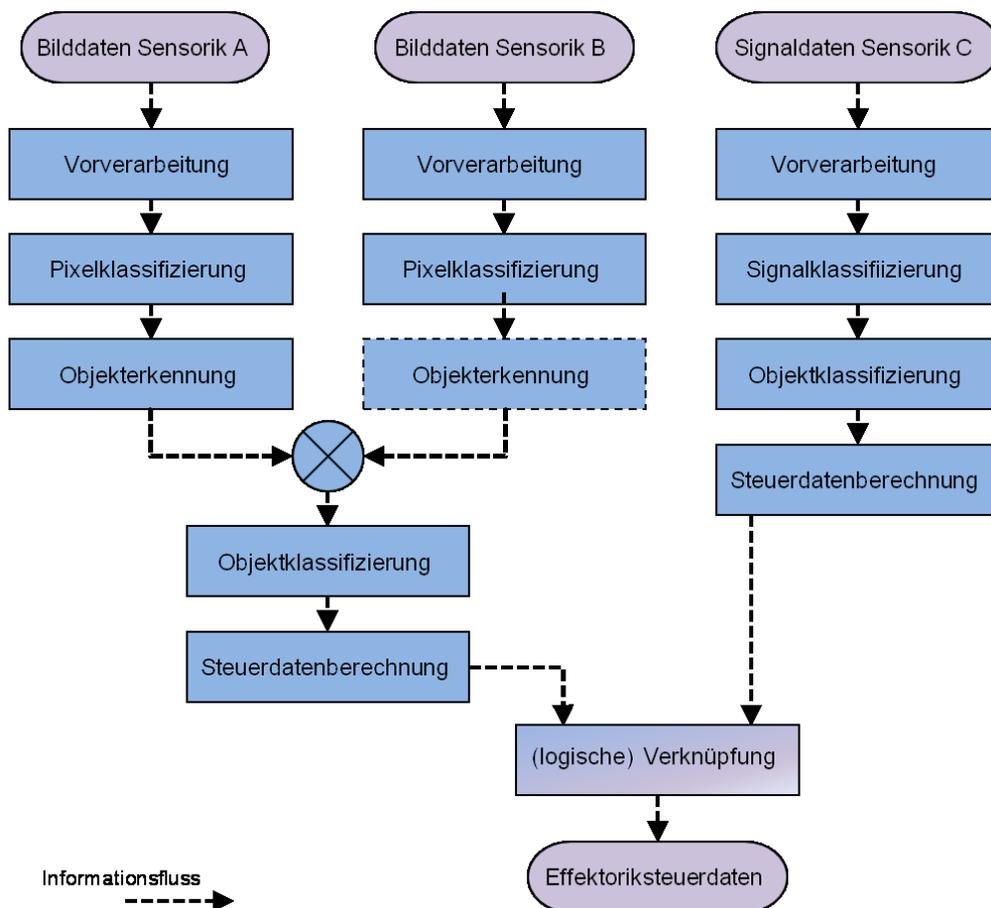


Abbildung 144: Komplexes Multisensorsystem mit integrierter Sensorfusion

Das Konzept ist auch geeignet für eine Kombination mit weiteren Sensoriken und dem Aufbau von komplexeren Multisensorsystemen, wie beispielsweise in Abbildung 144 dargestellt. Die Zusammenführung der Steuerdaten für die Effektorik wird in der letzten Maschinengeneration auf einer SPS bzw. „Selbst programmierbaren Steuerung“ in der Verstärkereinheit durchgeführt.

Im Folgenden werden drei Variantenentwicklungen erörtert, welche vom Typ Rutschensortierer sind und auf dem vorgestellten Sensorfusionskonzept basieren.

9.2.2 UV/VIS-Transmission

Aus den spektralen Analysen von Altglasscherben, welche in 8.2.1 erörtert wurden, ergibt sich, dass spezifische Glasarten unter Berücksichtigung der Färbung mittels UV-Absorptionskante differenziert werden können. Insbesondere zur Differenzierung von Kalknatron-Silikatglas und Glaskeramik wurde eine geeignete Sensorfusionssensorik entwickelt und patentiert (111), welche nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet ist, dass

„die emittierten Lichtstrahlen durch den Altglasmaterialstrom hindurch auf die Detektiereinheit auftreffen und die Detektion des Sonderglases aufgrund eines Vergleiches der UV-Transmissionswerte des Altglasmaterialstroms mit zuvor aus standardisierten Materialuntersuchungen erhaltenen UV-Transmissionswerten erfolgt und zum Vergleich der UV-Transmissionswerte derjenige als UV-Absorptionskante bezeichnete Bereich von Transmissionswerten herangezogen wird, bei welchem mit abnehmender Wellenlänge keine zunehmende Transmission mehr auftritt.“

Zur Erläuterung ist in Abbildung 145 ein Konzeptschema der realisierten industriellen Lösung mit den wesentlichen Komponenten dargestellt.

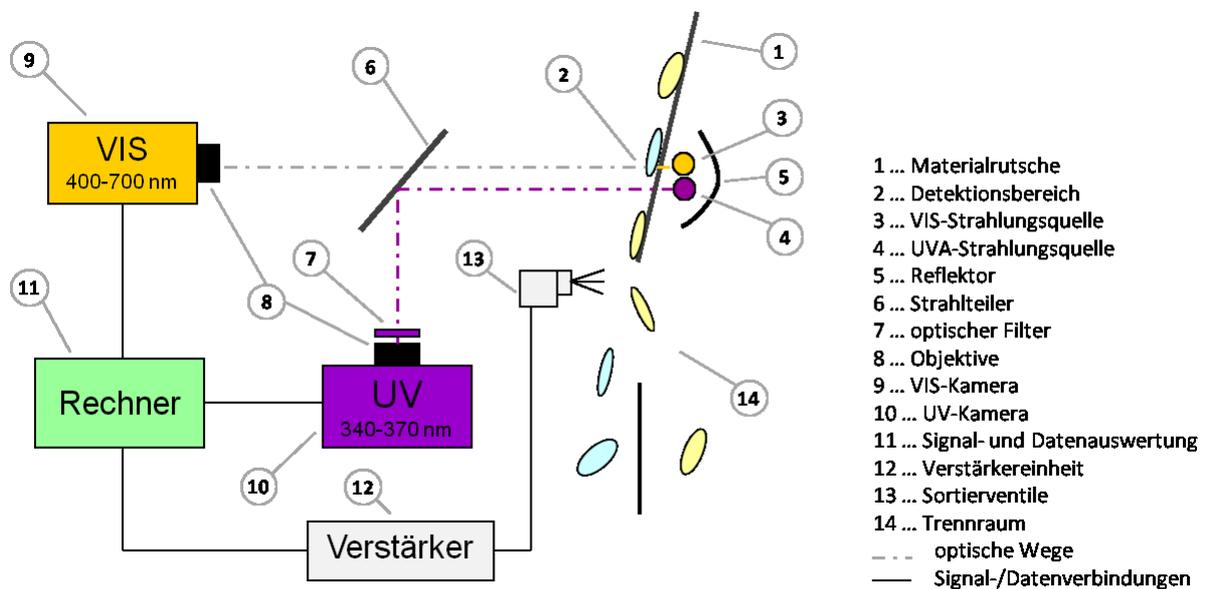


Abbildung 145: Systemschema der UVA/VIS-Transmissionssensorik

Auf einer Materialrutsche (1), welche aus für UV- sowie VIS-Licht transparentem Quarzglas besteht, gleiten die zu sortierenden Partikel durch den Detektionsbereich (2). Im Detektionsbereich direkt hinter der Materialrutsche sind zwei Leuchtstoffröhren in geringem

Abstand zueinander positioniert. Eine Leuchtstoffröhre (3) emittiert tageslichtähnliche Strahlung, die andere Leuchtstoffröhre (4) Strahlung im UVA-Wellenlängenbereich mit einem Intensitätsmaximum bei etwa 360 nm. Mittels Reflektor (5) wird die Strahlung beider Strahlungsquellen gebündelt und durch die Materialrutsche auf die zu sortierenden Partikel gerichtet. Die Strahlung, welche beim Durchgang durch die Partikel entsprechend den Absorptionseigenschaften modifiziert wird, wird auf der gegenüberliegenden Seite mittels Strahlteiler (6) wellenlängenselektiv aufgetrennt. Licht im Wellenlängenbereich > 400 nm geht nahezu unbeeinflusst durch den Strahlteiler hindurch und trifft auf eine RGB-Zeilenkamera (9). Der Strahlungsanteil < 400 nm wird im rechten Winkel in Richtung einer UV-empfindlichen, monochromen Zeilenkamera (10) abgelenkt und mittels optischen Bandpassfilter (7) auf den auswertungsrelevanten Wellenlängenbereich von 340 bis 370 nm eingeschränkt.

Die Bilddaten beider Kameras werden an die Signal- und Datenauswertungseinheit (11) übermittelt und entsprechend der zuvor erörterten sowie in Abbildung 143 dargestellten Datenverarbeitungsstruktur verarbeitet. Dabei entspricht die RGB-Zeilenkamera der Sensorik A und die UV-Zeilenkamera der Sensorik B. Aus den RGB-Bilddaten werden die pixelbasierten Farbdaten und die grundlegende Objekteigenschaften - wie etwa die Fläche, Form, Farbklassenzugehörigkeit und Lage - errechnet. Aus den UV-Bilddaten wird in Kombination mit den RGB-Bilddaten ein glasartspezifischer UV-Faktor ermittelt. Zur Erläuterung der Funktion sind dazu in Abbildung 146 nochmals beispielhaft die glasspezifischen UV-Absorptionskanten und die durch die eingesetzten Bauteile festgelegten Detektionsbereiche der beiden Sensoren dargestellt.

Wie aus der Abbildung 146 ersichtlich ist, liegt der UV-Detektionsbereich zwischen der UV-Absorptionskante für Glaskeramik (P11) und Kalknatron-Silikatglas (P1). Glaskeramikobjekte absorbieren das von der Strahlungsquelle emittierte UV-Licht nahezu vollständig in diesem Bereich, die transmittierte Strahlungsleistung bzw. detektierte Intensität ist sehr gering. Im Gegensatz dazu absorbieren Kalknatron-Silikatglasobjekte im Detektionsbereich kaum, die detektierte Intensität ist deutlich höher als im Fall der Glaskeramikobjekte. Wesentlich dabei ist, dass ein UV-Detektionsbereich zwischen den UV Absorptionskanten für die Analyse herangezogen wird, da nur dort eine verlässliche Unterscheidung der beiden Glasarten möglich ist.

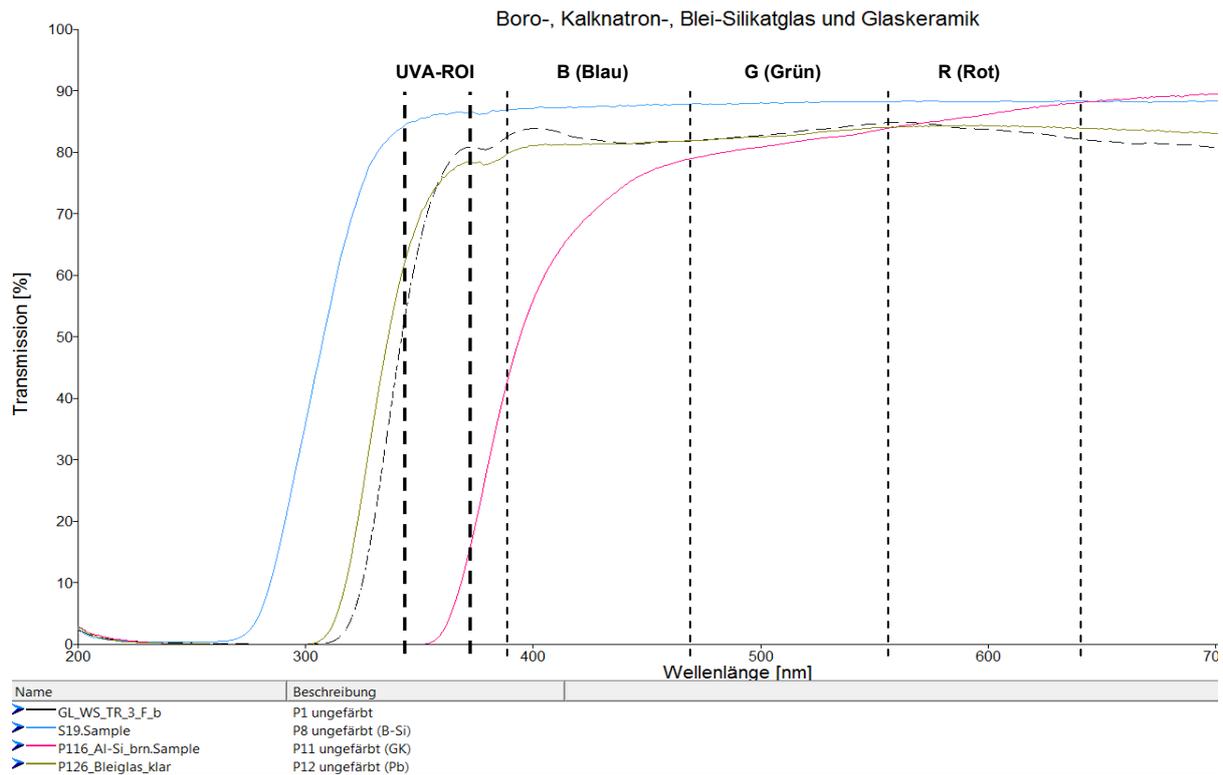


Abbildung 146: UV- und RGB-Detektionsbereiche zur Ermittlung des glasartspezifischen Kennwertes

In Abbildung 147 ist rechts ein RGB-Bilddatenausschnitt (a) mit sehr ähnlich gefärbten Glaskeramikscherben (GK1, GK2, GK3) sowie Kalknatron-Silikatscherben (KN1 bis KN5) und links der korrespondierende UV-Bilddatenausschnitt (b) dargestellt. Die pixelbasierten detektierten UV-Intensitätswerte wurden mit 8 Bit-Auflösung digitalisiert und sind im UV-Kamerabildausschnitt als entsprechende Graustufenwerte abgebildet. Zudem ist zu jeder Scherbe der UV-Intensitätsmittelwert angegeben. Kalknatron-Silikatscherben - wie KN3, KN4 und KN5 mit hoher UV-Transmissionsintensität - sind hellgrau, Glaskeramikscherben - wie GK2 und GK3 mit sehr geringer UV-Transmissionsintensität - sind schwarz dargestellt. Die braun gefärbten Kalknatron-Silikatscherben KN1 und KN2 weisen auch vergleichsweise geringe UV-Intensitätsmittelwerte von 39,4 und 34,1 auf. Im Gegensatz dazu liegt der UV-Intensitätsmittelwert der unbunten und im VIS-Bereich hochtransparenten Glaskeramikprobe GK1 mit 67,8 deutlich darüber. Dies spiegelt den analysierten Einfluss der Färbung auf die UV-Absorptionskante gut wieder. Eine einfache Klassifizierung dieses Scherbentyps alleine an Hand der detektierten UV-Bilddaten und mittels Schwellwertbewertung ist nicht möglich.

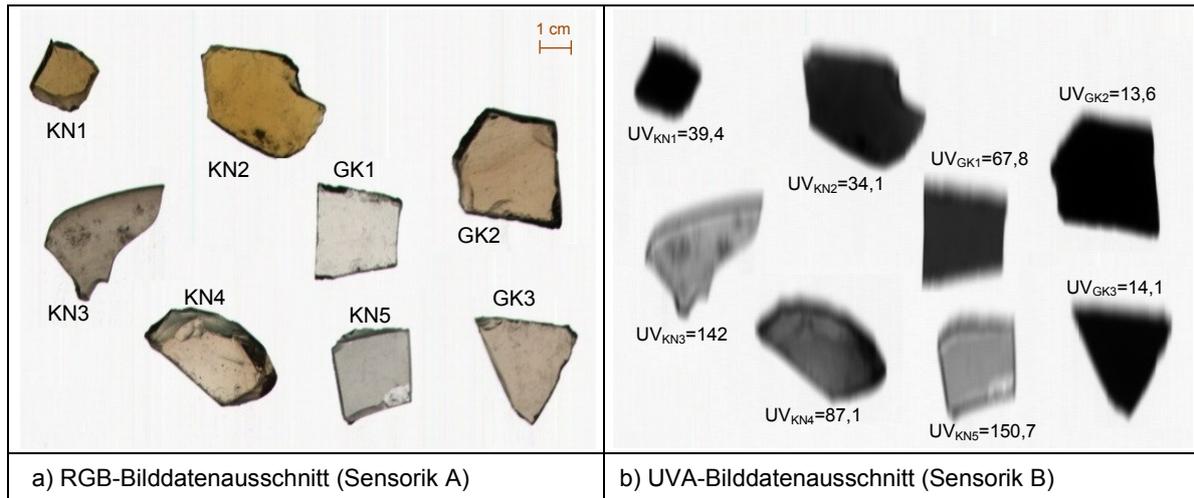


Abbildung 147: RGB- und UVA-Bilddaten von repräsentativen Glasscherbenmustern

Die Identifikation von unbunten-, rauch-, honig- und braunfärbigen Glaskeramikscherben erfolgt daher durch eine mehrstufige Auswertung. Sofern eine detektierte Scherbe einer der genannten Farbklassen zugeordnet wird, wird über einen definierten Objektpixelbereich der Blau-Intensitätsmittelwert aus den RGB-Bilddaten und der UV-Intensitätsmittelwert aus den detektierten UV-Bilddaten gebildet. In einem nächsten Schritt wird der Quotient von UV- zu Blau-Intensitätsmittelwert berechnet. Dadurch erfolgt eine Normierung, wodurch der Einfluss der Objektgeometrie und Färbung auf die Lage und Steigung der UV-Absorptionskante eliminiert wird. Die in Tabelle 60 dazu angegebenen detektierten und normierten UV-Intensitätsmittelwerte UVN [#] der behandelten Glasproben bestätigen dies. Die UVN -Werte aller drei Glaskeramikproben (GK1, GK2, GK3) liegen nun deutlich unter denen der Kalknatron-Silikatproben (KN1 bis KN5)

| Kennwert [#] | KN1 | KN2 | KN3 | KN4 | KN5 | GK1 | GK2 | GK3 |
|---------------------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| UV | 39,4 | 34,1 | 142,0 | 87,1 | 150,7 | 67,8 | 13,6 | 14,1 |
| UVN ($UV/Blau$) | 0,63 | 0,60 | 1,43 | 0,74 | 0,95 | 0,36 | 0,14 | 0,10 |

Tabelle 60: Detektierte und normierte UV-Transmissionsintensitätswerte repräsentativer Glasproben

Der objektbezogene UVN -Wert wird anschließend mit farbklassenabhängigen Referenzschwellwerten verglichen. Sofern der berechnete UVN -Wert kleiner als der relevante Schwellwert ist, handelt es sich um Glaskeramik. Die Referenzschwellwerte UVN_{Ref} wurden mittels Versuchsreihen ermittelt. Beispielsweise liegt UVN_{Ref} für unbunte- und rauchfarbige Scherben bei 0,55 und für honig- oder braunfarbige Scherben bei 0,40. Die Referenzschwellwerte sind wie die Farbklassentabelle im Datenrechner abgespeichert. Am

Ende der Bilddatenverarbeitung werden - basierend auf den ermittelten Objektkennwerten und der Parametrierung - die Steuerdaten generiert.

Die Sortierer, welche mit einer UV/VIS-Transmissionssensorik ausgerüstet sind, sind für die Sortierung von Scherben nach deren Transmissionsfarbe, -intensität und/oder der Glasart (Kalknatron-Silikatglas, Glaskeramik und Borosilikatglas) geeignet.

9.2.3 Lumineszenz in Kombination mit VIS-Transmission

Aus den spektralen Analysen von Altglasscherben, welche in 8.2.1 erörtert wurden, ergibt sich, dass mittels UV-Absorptionskante zwischen Kalknatron-Silikatglas und Blei-Silikatglas nicht differenziert werden kann. Diese zweitgenannte Sonderglasart zeichnet sich aber durch die in 8.3.5 beschriebene charakteristische Lumineszenzeigenschaft aus. Zur Identifizierung von Blei-Silikatglas in einem Altglasscherbenstrom wurde darauf basierend eine geeignete Sensorik entwickelt und ebenfalls patentiert (112), welche nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet ist, dass

*„- die Objekte zusätzlich mit sichtbarem oder IR-Licht außerhalb des Wellenlängenbereichs des Fluoreszenzlichts bestrahlt werden,
- das Transmissionslicht des sichtbaren oder IR-Lichts nach dem Durchgang durch das Objekt detektiert wird,
und ein Objekt dann als bleihaltig definiert wird, wenn sowohl Fluoreszenzlicht für zumindest einen vorbestimmten, der Fluoreszenz von bleihaltigen Gläsern entsprechenden Wellenlängenbereich in einem vorbestimmten Intensitätsbereich vorliegt, als auch Transmissionslicht in einem vorbestimmten Intensitätsbereich mit einer Intensität größer Null ist.“*

Zur Erläuterung der industriellen Umsetzung ist in Abbildung 145 ein Konzeptschema mit den wesentlichen Komponenten dargestellt. Gleich wie bei der zuvor diskutierten UVA/VIS-Transmissionssensorik gleiten die Glasscherben und Störstoffpartikel auf einer geeigneten Materialrutsche (1), welche aus für UV- und VIS-Licht transparentem Quarzglas besteht, durch den Anregungs- und Detektionsbereich (2). Im Detektionsbereich direkt hinter der Materialrutsche sind eine Leuchtstoffröhre (3) und eine LED-Linienbeleuchtung (4) in geringem Abstand zueinander positioniert. Die Leuchtstoffröhre (3) emittiert Strahlung im UVC-Wellenlängenbereich mit einem Intensitätsmaximum bei 254 nm. Mittels eines speziell entwickelten wellenlängenselektiven Reflexionsfiltersystems wird die UVC-Strahlung der Leuchtstoffröhre gefiltert und durch die Materialrutsche auf die Sortierpartikel gerichtet. Von

Vorteil ist, dass die speziell entwickelten Reflexionsfilter kaum Alterungseffekte, wie dies üblicherweise bei Transmissionsfiltern bei UV-Bestrahlung der Fall ist, unterliegen. Diese Beleuchtungseinheit dient der Lumineszenzanregung. Die LED-Linienbeleuchtung (4) emittiert Strahlung oberhalb von 500 nm, welche im Wesentlichen außerhalb des Lumineszenzwellenlängenbereichs von Bleisilikatglas liegt. Die Strahlung wird mittels Diffusionselement ebenfalls durch die Materialrutsche auf die Sortierpartikel gerichtet.

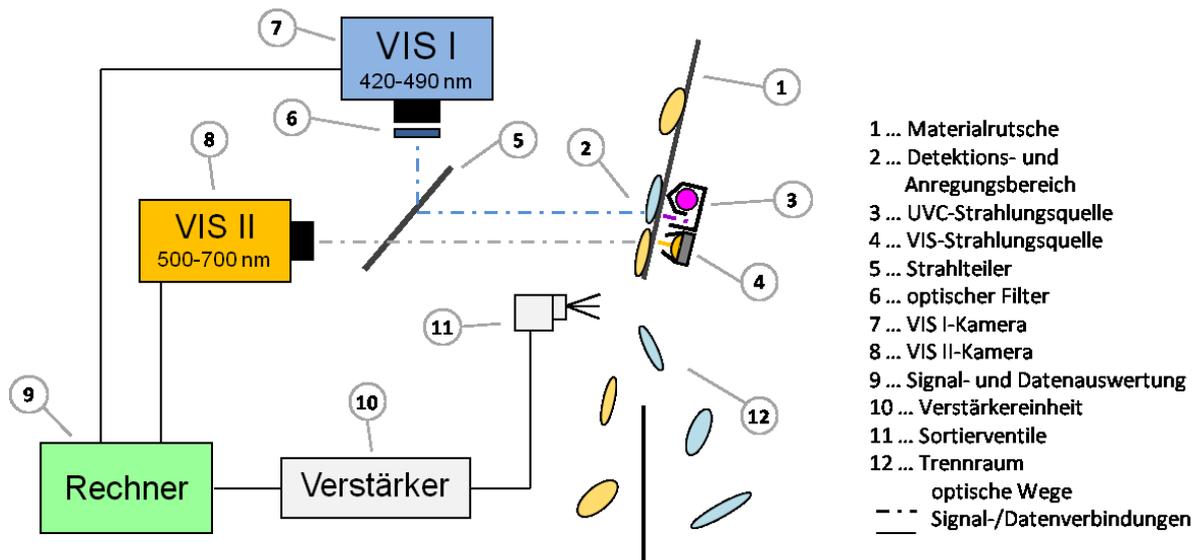


Abbildung 148: Systemschema der Lumineszenz/VIS-Sensorik für die Altglassortierung

Die Strahlung der LED-Linienbeleuchtung, welche beim Durchgang durch die Partikel entsprechend den Absorptionseigenschaften modifiziert wird, trifft auf der gegenüberliegenden Seite auf eine RGB-Zeilenskamera (8) auf und wird von dieser detektiert. Sofern ein Glaspartikel Lumineszenzeigenschaft hat, erfolgt an der der Materialrutsche zugewandten Partikeloberfläche im Anregungsbereich (2) eine Lumineszenzanregung. Ein wesentlicher Teil dieser Lumineszenz wird nach Durchgang durch das Glaspartikel auf der, der Materialrutsche abgewandten Partikeloberfläche emittiert und mittels Strahlteiler (5) wellenlängenselektiv abgelenkt. Der Strahlungsanteil < 500 nm wird im rechten Winkel in Richtung einer hochempfindlichen und monochromen TDI-Zeilenskamera (7) abgelenkt sowie mittels optischem Bandpassfilter (6) bzw. ROI-Filter auf den Wellenlängenbereich von 420 bis 490 nm eingeschränkt. So gelangt nur für Blei-Silikatglas charakteristische Lumineszenzstrahlung zur TDI-Zeilenskamera und wird von dieser detektiert. Sofern keine Lumineszenz im ROI-Bereich auftritt, gelangt keine Strahlung zur TDI-Kamera. Die zu Grunde liegende Detektortechnik und wesentliche Funktionsdaten sind in der Sensorübersicht unter 5.3.2.2 angeführt.

Da die Bilddatenübertragung und die Datenverarbeitungsstruktur ähnlich wie bei der UVA/VIS-Transmissionssensorik aufgebaut sind, wird im Folgenden nur mehr auf die wesentlichen Unterschiede in Hinblick auf den Bewertungsalgorithmus eingegangen.

Die RGB-Zeilenkamera (8) entspricht der Sensorik A und die TDI-Zeilenkamera (7) der Sensorik B in Abbildung 143. Die Strahlung, welche von der Sensorik A detektiert wird, beinhaltet systembedingt nur geringe Anteile an blauem und violetttem Licht. Die Bilddaten beinhalten deshalb nur bedingt nutzbare Informationen zum Absorptionsverhalten der Glaspartikel in diesem Wellenlängenbereich. Aus den Bilddaten der Sensorik A werden pixelbasierte und qualitativ eingeschränkte Farbdaten und ein objektbezogener Transmissionsmittelwert sowie die grundlegende Objekteigenschaften - wie die Fläche, Form und Lage - berechnet. Aus den Lumineszenzbilddaten der Sensorik B wird unter Berücksichtigung der Objekteigenschaften ein objektspezifischer Lumineszenzfaktor UVL [#] ermittelt.

Zur weiteren Erläuterung der Funktion und Berechnung von LUM ist in Abbildung 149 beispielhaft ein RGB-Bilddatenausschnitt (a) mit unbunten transparenten Kalknatron- (KN1, KN2, KN3) und Blei-Silikatglasscherben (PB1 bis PB4) dargestellt. Links ist der entsprechende Lumineszenzbilddatenausschnitt (b) mit den objektspezifischen LUM-Werten dargestellt.

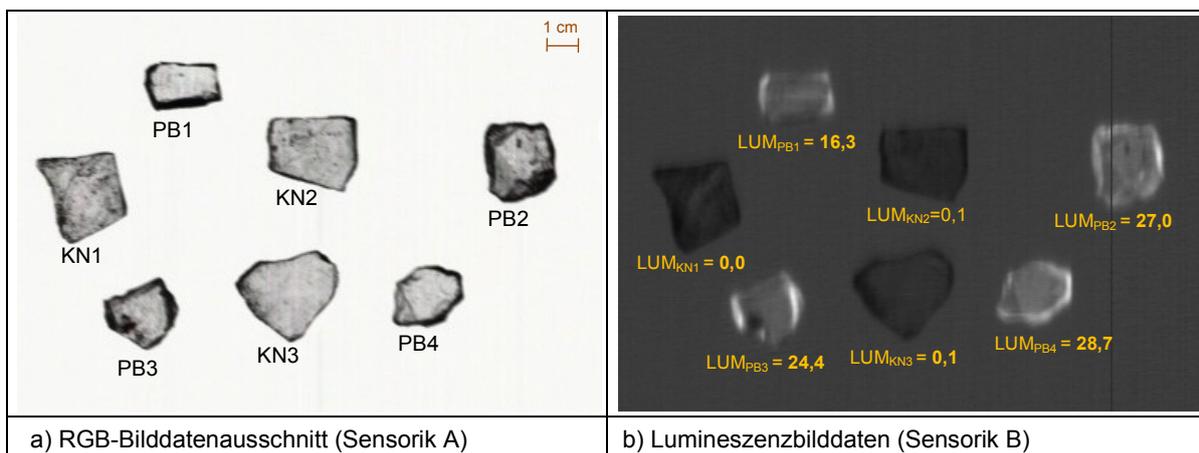


Abbildung 149: RGB- und Lumineszenzbilddaten von repräsentativen Glasscherbenmustern

Im Lumineszenzbild (b), in welchem die Lumineszenzintensitätswerte als Grauwerte mit 8 Bit aufgelöst dargestellt sind, erscheinen die Blei-Silikatglasscherben hellgrau bis weiß. Die Kalknatron-Silikatglasscherben heben sich kaum vom Bildhintergrund ab bzw. erscheinen dunkelgrau. In Folge von Brechungseffekten weisen Blei-Silikatglasscherben, insbesondere im Bereich der Bruchkante, sehr hohe Intensitätswerte auf. Im Gegensatz dazu bewirken, im

Fall der nicht lumineszierenden Kalknatron-Silikatscherben, Streu- und Brechungseffekte eine stärkere Reduktion der Transmissionsintensität als im Innenbereich.

In Abbildung 150 ist dazu das Intensitätsprofil (b) von vier nebeneinander angeordneten Scherben aus dem Musterset (a) dargestellt, welches die lokal extremen Intensitätsverhältnisse sehr eindrucksvoll wiedergibt. Das Hintergrundniveau ist zur Orientierung als gestrichelte Linie eingezeichnet.

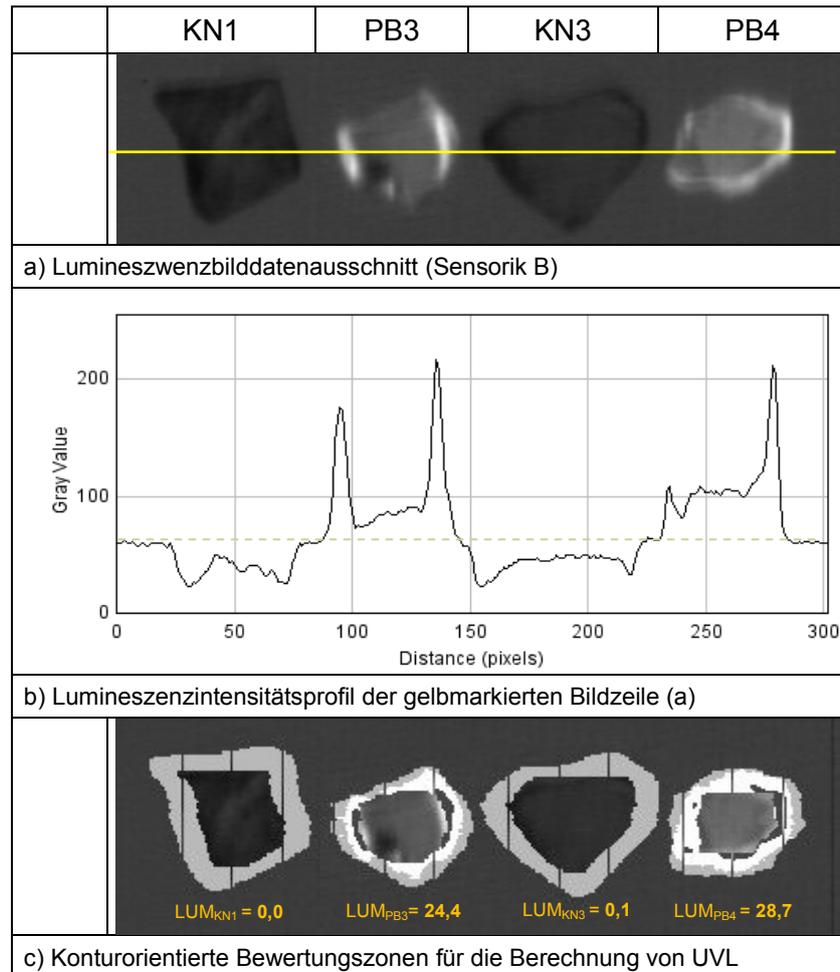


Abbildung 150: Vergleich der Lumineszenzintensitätsdaten von Kalknatron- und Blei-Silikatglasscherben

Die Nutzung des beschriebenen Bruchkanteneffekts ermöglicht eine optimierte Blei-Silikatglaserkennung. Insbesondere auch von Blei-Silikatglasscherben mit schwacher Lumineszenzintensität in Folge eines geringen Bleioxidgehalts. Aus der mit Hilfe der RGB-Bilddaten ermittelten Objektform wird eine Bewertungszone, wie in Abbildung 150 (c) dargestellt, entlang der Randkontur individuell für jedes Partikel abgeleitet. Nur für diesen Bereich wird der Intensitätsmittelwert berechnet. Der Intensitätsmittelwert wird mit dem Hintergrundmittelwert verrechnet und das Ergebnis ergibt den Lumineszenzfaktor LUM . Wie in Abbildung 149 (b) bzw. Abbildung 150 (c) dargestellt, liegen mit diese

Berechnungsmethode die UVL-Werte für die Kalknatron-Silikatglasmuster bei 0 oder knapp darüber und für die Blei-Silikatglasscherben bei über 25. Sofern für ein Partikel eine Transmissionsintensität vorliegt und der zugeordnete Lumineszenzfaktor über einem einstellbaren Referenzschwellwerte LUM_{Ref} liegt, wird die Scherbe bzw. das Objekt als Blei-Silikatglasscherbe klassifiziert. Der Referenzschwellwertbereich und LUM_{Ref} als Funktion des Bleigehalts wurden mittels Versuchsreihen ermittelt. Für schwach bleihaltige Scherben mit einem Bleigehalt von etwa 0,25 % liegt LUM_{Ref} beispielsweise bei etwa 3. Am Ende der Bilddatenverarbeitung werden die Steuerdaten generiert, wiederum basierend auf den ermittelten Objektkennwerten und der Parametrierung.

Die entwickelte Bewertungsmethode ergibt auch für verschmutztes Aufgabegut eine hohe und stabile Differenzierungsgüte. Zudem ist das entwickelte Detektionskonzept auch in Hinblick auf Scherben mit anhaftenden Etiketten bzw. Etikettresten von Vorteil. Weißes Papier generell und auch Papieretiketten auf Glasscherben emittieren unter UV-Licht weiß-bläuliches Lumineszenzlicht mit hoher Intensität, welches sich bezüglich des Wellenlängenbereiches mit der Blei-Silikatglaslumineszenz stark überlappt. Sofern die etikettierte Fläche einer Scherbe der Materialrutsche zugewandt ist, erfolgt an der Etikettenoberfläche Lumineszenzanregung, ohne dass wesentliche Anteile der Lumineszenzstrahlung durch das Etikett und die Glasscherbe emittiert werden. Im Fall, dass die etikettierte Fläche einer Scherbe von der Materialrutsche abgewandt ist, absorbiert die Kalknatron-Silikatglasscherbe selbst die UVC-Strahlung und es kommt zu keiner Lumineszenzanregung.

Sortierer, welche mit der beschriebenen Sensorfusionssensorik zur Identifikation von Blei-Silikatglasscherben ausgerüstet sind, sind für die Trennung von Altglas nach deren Transmissionsfarbe, -intensität und/oder der Glasart (Kalknatron-Silikatglas, Blei-Silikatglas) geeignet. Anzumerken ist, dass nur die Erkennung und Differenzierung von gesättigten Transmissionsfarben - in Folge des eingeschränkt genutzten VIS-Bereichs - möglich ist.

9.2.4 Lumineszenz in Kombination mit NIR-Transmission

Im Gegensatz zur diskutierten Lumineszenzanregungstechnik für die Altglassortierung muss bei der Sortierung von mineralischen Schüttgütern, welche überwiegend semi- oder nichttransparent sind, die Anregung frontal erfolgen. Zudem ist, wie die spektralen Analysen in 8.3.5 ergeben haben, eine rohgut- und/oder lagerstättenspezifische Abstimmung der Anregungs- und Detektionswellenlängenbereiche erforderlich. Der relevante

Anregungsbereich liegt zwischen 200 bis 500 nm. Die wesentlichen Emissionsmaxima liegen in einem Bereich von 350 bis 750 nm.

Im Rahmen eines geförderten Teilprojektes wurde die Lumineszenzanregungstechnik für die Altglassortierung entsprechend den Anforderungen in der Mineralaufbereitung weiterentwickelt. In Abbildung 151 ist dazu das Lösungskonzept dargestellt. Basierend darauf wurde ebenfalls ein Schutzrecht angemeldet. Es berücksichtigt insbesondere eine einfache rohgspezifische Konfiguration und ist unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass ein Materialstrom aus mineralischen Objekten mit Anregungs- sowie einem sogenannten „Objekterkennungslicht“ bestrahlt wird und ein Objekt, sofern Lumineszenz in einem bestimmten Wellenlängenbereich und einer bestimmten Intensität vorliegt, einer bestimmten Mineralart zugeordnet wird (113).

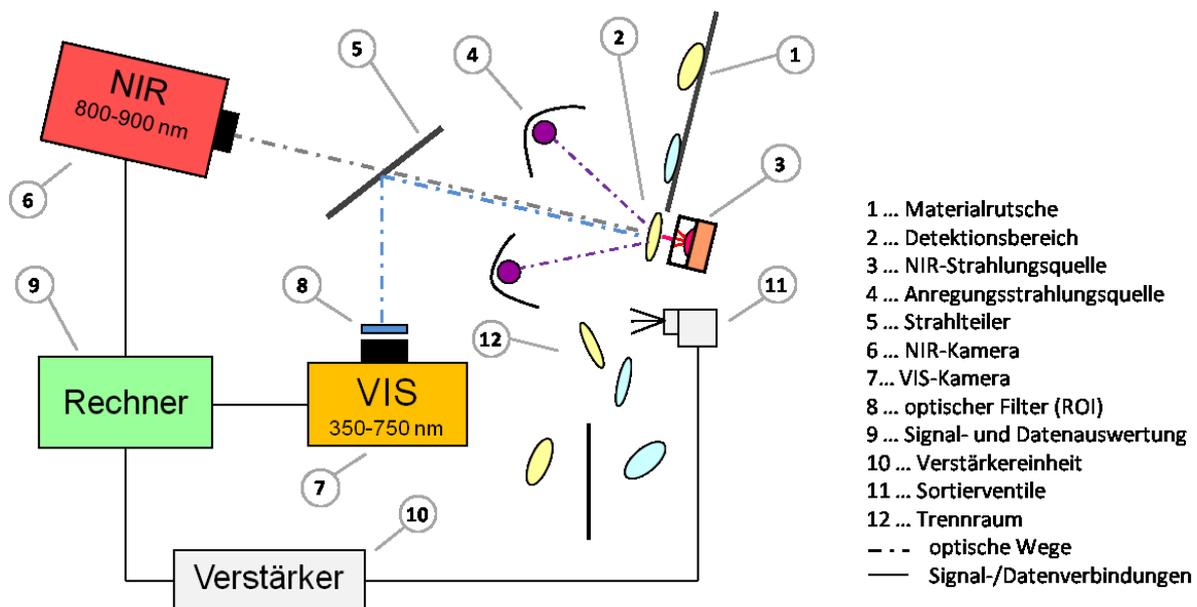


Abbildung 151: Systemschema der Lumineszenz/NIR-Sensorik mit Frontanregung für die Sortierung von Industriemineralien

Wie in Abbildung 151 dargestellt, gleiten die zu sortierenden Partikel auf einer metallischen oder keramischen Materialrutsche (1) in den Detektionsbereich (2), welcher der Rutsche unmittelbar nachgelagert ist. Gegenüber einer monochromatischen NIR-Zeilenskamera (6) ist das Objekterkennungslicht, welches als NIR-Strahlungsquelle (3) ausgeführt ist, positioniert. Insbesondere aus thermischen Gründen und wegen ihrer geeigneten Strahlungscharakteristik wird eine LED-Linienbeleuchtung mit einem Emissionswellenlängenbereich zwischen 800 bis 900 nm eingesetzt. Sofern kein Objekt im Detektionsbereich ist, wird die NIR-Strahlung mit der maximalen Intensität von der NIR-

Zeilenkamera detektiert. Mineralische Partikel bzw. Objekte absorbieren die Strahlung in der Regel stark und die Transmissionsintensität ist sehr gering oder null. Deshalb werden Objekte, welche durch den Detektionsbereich fallen, negativ bzw. als „Schatten“ mit entsprechender Größe und Kontur abgebildet. Desweiteren sind zwei Anregungslichtquellen (4) frontal und symmetrisch zur NIR-Strahlungsquelle positioniert. Sofern bei Objekten Lumineszenz angeregt wird, wird diese von einer hochempfindlichen TDI-Kamera detektiert. In Abhängigkeit der Lumineszenzeigenschaft des Rohguts bzw. der Merkmalsklassen müssen lediglich die Anregungslichtquellen (4) und der optische ROI-Filter (8) angepasst werden. Als Anregungslichtquellen werden UVC- bzw. UVB-Leuchtstoffröhren und LED-Linienbeleuchtungen, welche im UVA-Bereich oder VIS-Teilbereichen emittieren, eingesetzt. Die Objekterkennungstechnik hingegen kann unverändert für eine Vielzahl mineralischer Rohgutarten eingesetzt werden.

In Bezug auf das zu Grunde liegende Sensorfusionskonzept und die damit verbundene Datenverarbeitung, welche in 9.2.1 dargelegt wurde, entspricht die Objektdetektion der Sensorik A und die Lumineszenzdetektion der Sensorik B. In Abbildung 152 sind dazu beispielsweise die beiden korrespondierenden Systemabbildungen (a, b) von Schwerspat- (S1, S2), Fluorit- (F1, F2) und Verwachsungsproben (SF1 bis SF7) dargestellt. Zum Vergleich sind direkt darunter fotografische Aufnahmen der Proben bei Tageslicht (c) und unter UVA-Licht (d) abgebildet⁴⁰. Die Anregung im Testsystem erfolgte bei einem Emissionswellenlängenmaximum von 360 nm mit zwei LED-Linienbeleuchtungen, der Detektionswellenlängenbereich wurde mittels ROI-Filter auf 400 bis 510 nm eingeschränkt.

Unter Tageslicht (c) erscheinen alle Proben weiß oder leicht verfärbt, was für eine farbbasierte Sortierung keinesfalls zielführend ist. Im Gegensatz dazu ist unter UV-Licht (d) Fluorit in Folge seiner blauen Lumineszenz sehr gut erkennbar. Wie aus dem Vergleich zwischen Lumineszenzbilddaten (b) und UV-Lichtfoto (d) gut ersichtlich ist, sind in Folge von hoher Lichtempfindlichkeit und örtlicher Abbildauflösung der eingesetzten Spezialkamera auch sehr kleine lokale Lumineszenzzentren von bewegten Partikeln sehr gut detektierbar (SF1 bis SF7). Reiner Schwerspat bzw. nicht lumineszierende Oberflächenzonen heben sich kaum oder nicht vom Hintergrund ab. Die Lage, Form und Größe der Schwerspat- und Verwachsungspartikel ist deshalb alleine auf Basis der Lumineszenzbilddaten nicht hinreichend bestimmbar.

⁴⁰ Lage der Objekte kann von der der Systemaufnahmen abweichen.

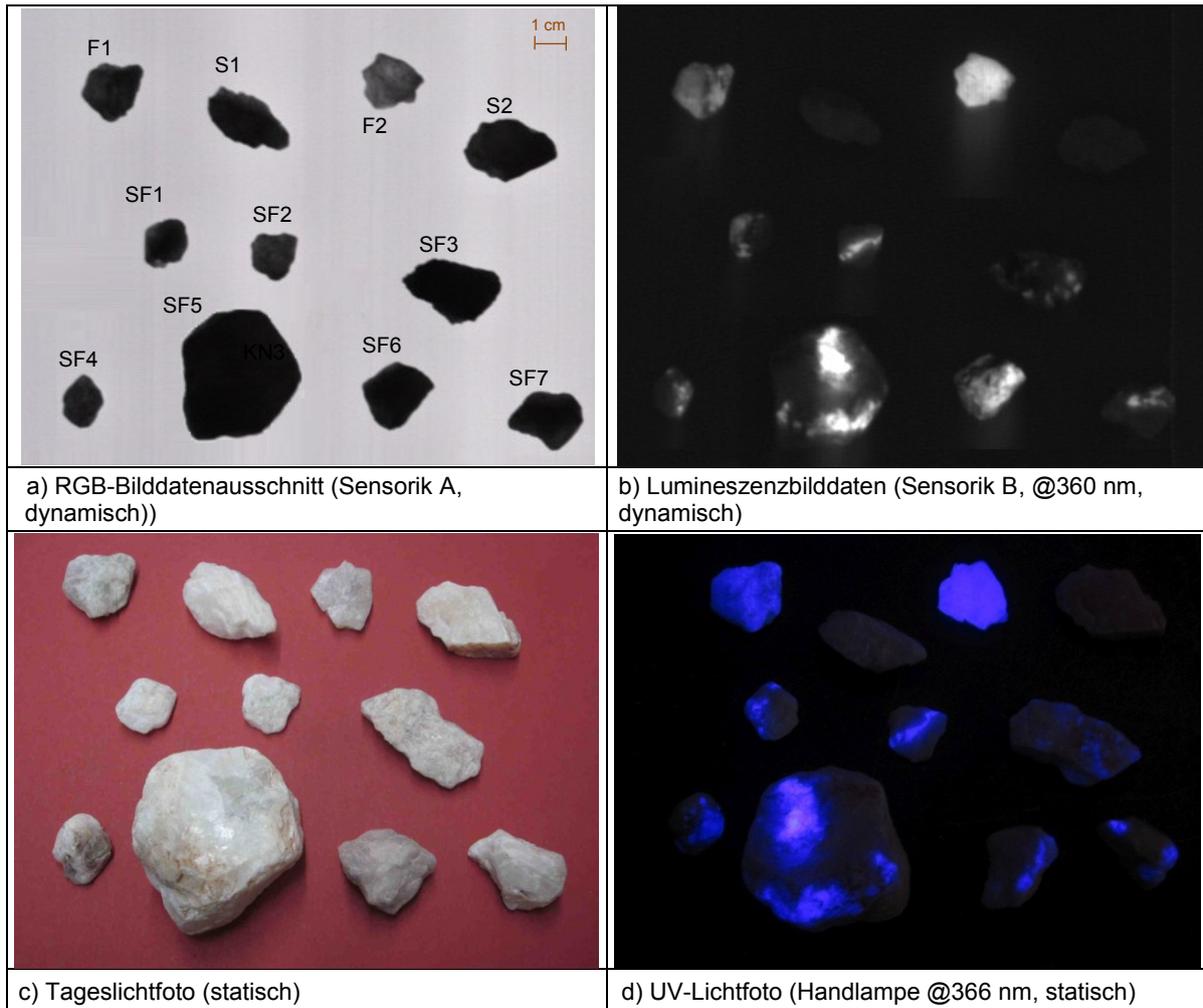


Abbildung 152: Systemaufnahmen (a, b) und fotografische Abbildungen (c, d) von repräsentativen Schwerspat-, Fluorit- und Verwachsungsproben - M002/2013

Zur Erläuterung der spezifischen Bilddatenauswertung und Objektklassifizierung ist in Abbildung 153 eine Auswahl an Körnern aus dem Musterst (a) nebeneinander angeordnet und ein repräsentatives Intensitätsprofil (b) daraus dargestellt. Das Hintergrundniveau und parametrierbare Intensitätsklassengrenzen sind zur Orientierung als gestrichelte Linie im Intensitätsprofildiagramm eingezeichnet. Auf der rechten Seite sind zudem den vier Intensitätsklassen (Back, LumK0, LumK1, LumK2) zugeordnete Grauwerte abgebildet. Darunter ist ein entsprechend dieser Zuordnung maskiertes Abbild (c) der Musterauswahl dargestellt.

Aus dem Intensitätsprofil ist insbesondere ersichtlich, dass die Detektion sehr dynamisch und sensitiv ist. Dadurch weisen auch kleine Fluoriteinschlüsse von 1 bis 2 mm im Schwerspat (SF2, SF3, SF5) signifikante bzw. nutzbare Intensitätsspitzen auf. Chemisch und mikrostrukturell bedingte großflächige Intensitätsunterschiede (S1, F1, F2, SF5) werden mit 8 Bit aufgelöst und im Wesentlichen linear über den ganzen Messbereich wiedergegeben.

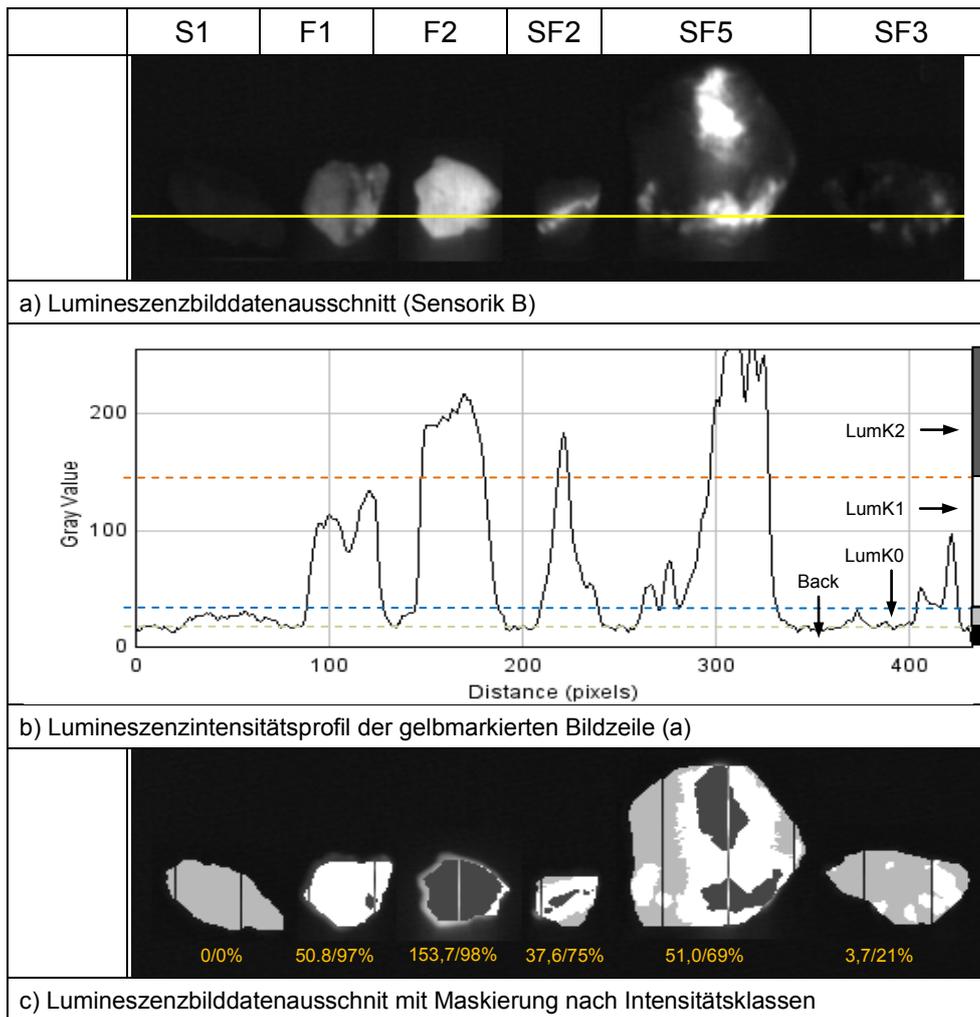


Abbildung 153: Vergleich der Lumineszenzintensitätsdaten von Schwerspat- und Fluorit- und Verwachsungsproben

In einem ersten Schritt des Bewertungsalgorithmus werden aus den Bilddaten der Sensorik A (a) wiederum zweidimensionale geometrische Partikel- bzw. Objekteigenschaften berechnet und eine Objektbewertungszone definiert. Anschließend wird jedes Objektpixel innerhalb der Bewertungszone, entsprechend dem detektierten Lumineszenzintensitätswert, einer Intensitätsklasse zugeordnet und ein maskiertes Abbild (c) des Partikels generiert. In einem nächsten Schritt wird über die Menge aller als lumineszierend klassifizierten Pixel (LumK1, LumK2) eines Partikels der Lumineszenzintensitätsmittelwert LUM gebildet und ein Lumineszenzflächenquotient A_{LUM} aus lumineszierender zu gesamter Objektfläche berechnet. In Tabelle 61 sind dazu die entsprechenden Kennwerte der Proben aus Abbildung 152 bzw. Abbildung 153 angeführt. Letztlich erfolgt die Klassifizierung mittels zweistufigem Entscheidungsverfahren und Referenzwertvergleich, welches den Intensitätsmittelwert LUM und/oder den Lumineszenzflächenquotienten A_{LUM} berücksichtigt.

| Probenkennung | Objektfläche [Pixel] | Lumineszenzfläche [Pixel] | A _{LUM} [#] | LUM [#] |
|---------------|----------------------|---------------------------|----------------------|---------|
| F1 | 1100 | 1067 | 0,97 | 50,8 |
| S1 | 1381 | 0 | 0,00 | 0 |
| F2 | 995 | 971 | 0,98 | 153,7 |
| S2 | 1769 | 0 | 0,00 | 0 |
| SF1 | 714 | 281 | 0,39 | 11,4 |
| SF2 | 689 | 520 | 0,75 | 37,6 |
| SF3 | 1857 | 393 | 0,21 | 3,7 |
| SF4 | 627 | 375 | 0,60 | 20,7 |
| SF5 | 5834 | 4026 | 0,69 | 51 |
| SF6 | 1367 | 1235 | 0,90 | 80,7 |
| SF7 | 1281 | 477 | 0,37 | 11,8 |

Tabelle 61: Berechnete Bewertungskennndaten repräsentativer Schwerspat-, Fluorit- und Verwachsungsproben

Der implementierte Algorithmus ermöglicht somit eine parametrierbare Merkmalskassenzuordnung der Partikel entsprechend ihrer mittleren Lumineszenzintensität und/oder oberflächlichen Verwachsungsverhältnisse.

Die Sortierer, welche mit einer Lumineszenz/NIR-Transmissionssensorik ausgerüstet sind, sind für die Sortierung von mineralischen Rohgütern nach deren Transmissionsintensitäten und/oder oberflächlichen Lumineszenzeigenschaften geeignet.

9.2.5 Industrielle Umsetzung und maschinenbauliche Integration

Die drei rohgutartspezifischen und auf Basis der Sensorfusion entwickelten Sensorikkonzepte konnten elektrisch und maschinenbaulich direkt in die bestehende Produktlinie der Binder+Co AG integriert werden. Die Integration in die Produktlinien CLARITY® und MINEXX® erfolgte schrittweise über mehrere Jahre. Der zu Grunde liegende Maschinenaufbau und die Funktionalität der beiden Produktlinien wurde bereits in 6.1.1 bzw. 6.1.2 erörtert.

In Abbildung 154 ist beispielsweise eine realisierte industrielle Detektorbox mit zwei Detektionsspuren zu je 500 mm Erkennungsbreite, welche in die Sortierer vom Typ CLARITY® integriert wurde, in unterschiedlicher perspektivischer Ansicht dargestellt. Daraus sind die Positionierung der wesentlichen Komponenten und der kompakte Aufbau der industriellen Lösung gut ersichtlich. Das Gehäuse hat in etwa die Maße 1.000 x 500 x 350 mm.

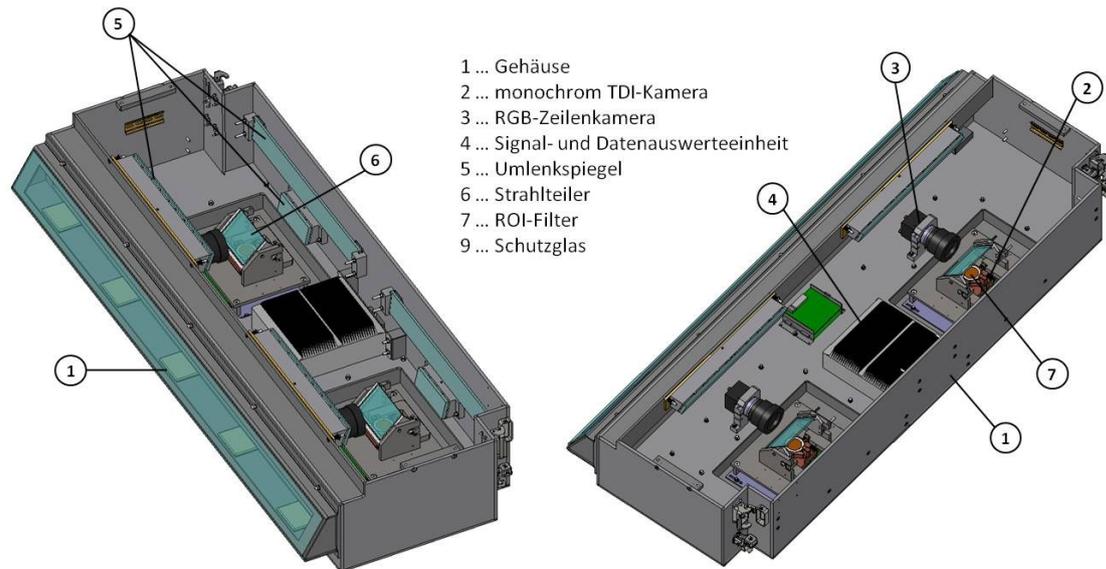


Abbildung 154: Detektorbox für „CLARITY® 10“ mit zwei Detektionsspuren zu je 500 mm Erkennungsbreite

Wesentliche gemeinsame Merkmale der industriellen Lösungen in Hinblick auf die Integration in Sortiermaschinen und den grundsätzlichen Einsatzanforderungen sind

- getrennte und modular aufgebaute Gehäuse für Strahlungsquellen und Detektoren,
- kompakte Bauform der Beleuchtungs- und Detektorbox,
- geringer Einbauabstand zwischen Detektor und Detektionsbereich,
- online-Regelung der Bestrahlungsintensität und Abgleich der Detektorsignale,
- einfache Nachrüstung von bzw. Integration in bereits installierte Maschinen,
- einfache Kombinierbarkeit mit anderen Sensoriken in Multisensorsystem,
- gleichartige Kamera- und Schnittstellentechnik,
- im Detektorgehäuse integrierte Datenauswerteeinheit für bis zu zwei Detektionseinheiten bzw. -spuren,
- hohe örtliche Abbildungsauflösung von etwa 0,3 x 0,3 mm/Pixel,
- einfache und robuste Objektklassifizierung im Kornbereich von 2 bis 60 mm,
- rechenleistungsschonende und multiple Eigenschaftsanalyse und

- quasi echtzeitfähige Signal- und Datenverarbeitung mittels paralleler Prozessarchitektur der Software, welche auf einer kompakten Industrierechnerplattform mit quad-core Prozessor und Windows-Betriebssystem läuft.

Die industriellen Lösungen unterscheiden sich einsatzabhängig lediglich bezüglich einiger Ausrüstungsdetails, wie

- der Strahlungsquellenanordnung bzw. -position
- der maximalen Emissionsintensität der Strahlungsquellen,
- dem Emissionswellenlängenbereich der Strahlungsquellen,
- den passiven optischen Bauteile bzw. dem ROI-Filtern und
- der Datenauswerte- und Klassifizierungsalgorithmen sowie deren Parametrierung.

Dazu ist beispielsweise in Abbildung 155 eine Detektorbox mit einer Beleuchtungsbox, welche für die Bleigasdetektion geeignet ist, als Schnittbild dargestellt. Durch die mehrfache Faltung des Strahlengangs bzw. optischen Weges mittels Spiegelumlenkung ist der erforderliche Einbauabstand zwischen Detektor und Detektorbereich vergleichsweise gering. Ohne die Abbildungsqualität zu reduzieren konnte dadurch der Einbauabstand von etwa 1 500 auf 500 mm reduziert werden. Dies ist wesentlich für einen kompakten Maschinenbau bzw. die Integration in bereits installierte Maschinen.

Sortiermaschinen mit Sensorfusionssensorik werden mit den Sortierbreiten von 700, 1.000 und 1.400 mm hergestellt und zeichnen sich durch

- hohe Trennungsgrade,
- hohe Verfügbarkeit,
- kornbereichsabhängige Durchsatzleistung von 6 bis 30 t/hm,
- im Vergleich zu röntgenbasierten Sortierern durch den sicherheitstechnisch unkritischen Strahlungsarbeitsbereich sowie geringeren Herstell- und Wartungskosten aus.

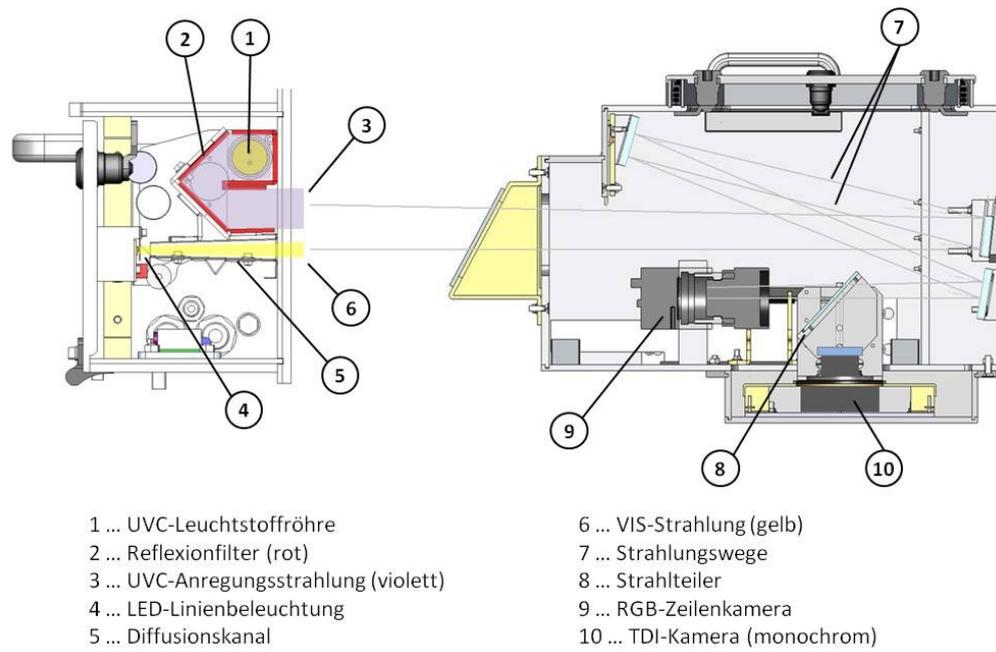


Abbildung 155: Schnittbild einer Beleuchtungs- und Detektorbox einer Lumineszenz/VIS-Transmissionssensorik für die Bleiglasdetektion

10 Einsatzerfahrungen mit Sensorfusionssensorik

Ausgehend von der einfachen optischen bzw. VIS-basierten Sortierung wurden in den letzten Jahren die in Kapitel 9 beschriebenen sensorfusions-basierten Sensoriken in Testsystemen und Sortiermaschinen der Binder+Co AG integriert und deren Einsatztauglichkeit im Bereich der primären und sekundären Rohstoffaufbereitung evaluiert. Stellvertretend sollen im Folgenden vier unterschiedliche und repräsentative Anwendungs- und/oder realisierte Einsatzbeispiele vorgestellt werden. Neben der Diskussion von Versuchs- und Einsatzergebnissen wird dabei insbesondere auch auf die Prozessintegration und vorgelagerte Rohgutkonditionierung eingegangen. Die Versuchsreihen und -auswertungen wurden überwiegend im Technikum der Binder+Co AG durchgeführt und teilweise durch Anlagenversuche sowie Einsatzerfahrungen ergänzt. Die Testsysteme entsprechen bezüglich der Ausführung und Ausstattung im Wesentlichen Seriensystemen und wurden bei Bedarf den jeweiligen Applikationsanforderungen angepasst.

10.1 Altglassortierung

Wie in 6.4.1 bereits ausführlich erörtert wurde, sind VIS-basierte Sortierer verschiedenster Ausführung die wesentlichen Trennaggregate in der Aufbereitung von Altglasrohgut und in unterschiedlich komplexen Prozessstrukturen installiert. In Anhang D sind dazu beispielhaft Prozessstrukturvarianten unterschiedlicher Komplexität und zeitlicher Zuordnung dargestellt. Seitens der Aufbereiter bestand bzw. besteht die Anforderung, die Sonderglasabtrennung mit minimalem Investitionsaufwand in die anlagenspezifischen Sortierverfahren zu integrieren. Die Sortiermaschinen, welche mit Sensorfusionssensorik und mit ein oder zwei Abweisewegen ausgerüstet sind, bieten diesbezüglich gute Voraussetzungen. Ausgehend vom typischen zweiteiligen Aufbereitungsverfahren, bei welchem im ersten Teil eine Vorbehandlung bzw. Konditionierung und im zweiten Teil eine häufig mehrstufig verschaltete sensorgestützte Sortierung des Altglasrohguts erfolgt, wird im Folgenden die Verfahrensintegration der Abtrennung von Glaskeramik- und Blei-Silikatglasscherben diskutiert.

10.1.1 Sortiergut- und Zielqualitäten

Die angestrebten Produktqualitäten wurden bereits generell und ausführlich in 6.4.1.2. erörtert. Sie werden zur Verständnisunterstützung hier nochmals in Hinblick auf den Einsatz der sensorfusions-basierten Sortierung und den folgenden Versuchsreihen kurz

zusammengefasst. Tabelle 62 zeigt fotografisch die relevanten Merkmals- bzw. Qualitätsklassen bei der Hohlglasaufbereitung. Der Glasbruch bzw. das Sortiergut ist unterschiedlich konditioniert, die Partikelspanne reicht typischerweise von 0/50 mm.

| | |
|--|---|
|  |  |
| MK1 bis MK3 - Kalknatron-Silikatglas bzw. Mischglas (alle Farben) | MK6 - KSP |
|  |  |
| MK7 - Glaskeramik | MK8 – Blei-Silikatglas |

Tabelle 62: Qualitäts- und Merkmalsklassen von Hohlglas

Der Gehalt der einzelnen Merkmalsklassen variiert stark und muss für jede Applikation gesondert analysiert werden. In starker Abhängigkeit von Sammelsystem und –region liegt der KSP-Gehalt typischerweise zwischen 500 und 50.000 g/t, der Gehalt an Blei-Silikatglasscherben zwischen 1.000 und 10.000 g/t und der Gehalt an Glaskeramik zwischen 15 und 500 g/t. Die Produktqualitätsziele in Bezug auf die genannten Sondergläser und glasfremden Störstoffe bzw. KSP werden zumeist individuell zwischen Aufbereiter und Wiederverwerter vereinbart und/oder durch Sammelsystemorgane übergeordnet geregelt. Beispielsweise wird dazu in der BVSE-Leitlinie T120 (10) ein KSP-Gehalt von < 20 g/t und ein Glaskeramik-Gehalt von < 5 g/t für den Partikelbereich größer 10 mm sowie von < 10 g/t für den Partikelbereich kleiner 10 mm vorgegeben. Bezüglich Pb- bzw. Schwermetallgehalt ist nur ein Richtwert von 200 g/t bzw. ppm angegeben.

10.1.2 Konditionierung

Für die Konditionierung bzw. Vorbehandlung des Altglasrohguts in Hinblick auf eine Aussortierung von Sondergläsern mittels sensorfusions-basierten Sensoriken gilt

grundsätzlich Gleiches wie beim Einsatz einfacher optischer bzw. VIS-basierter Sortierer. Der Glasbruch soll nach der Vorbehandlung möglichst

- trocken,
- frei von loser Organik, Haftkorn oder Staub und
- in enge Partikelbereiche (~1 : 3) klassiert

vorliegen. Idealerweise kommt dabei im Konditionierungsprozess neben geeigneter Brech-, Sieb- und klassischer Trenntechnik eine trockene Scherbenwäsche (TW) zum Einsatz. Siehe dazu auch 6.4.1.1.

10.1.3 KSP- und Glaskeramik-Abtrennung aus Mischglas

Im ersten Fallbeispiel wurde eine von einem Mitbewerber zu Ende des letzten Jahrtausends in Frankreich installierte Hohlglasaufbereitungsanlage, welche nur für die Aussortierung von keramischen und mineralischen Fremdstoffen wie KSP (MK6) konzipiert war, um die Funktion der Glaskeramikabtrennung erweitert. Zudem sollte nach Möglichkeit auch der KSP-Gehalt im Produkt nochmals reduziert werden.

10.1.3.1 Verfahrenskonzept

In Abbildung 156 ist dazu das realisierte Verfahrensschema zur Herstellung von Mischglas (MIX-Produkt) dargestellt. Die Anlagenleistung beträgt etwa 20 t/h. Das ursprüngliche Verfahren bzw. der Altbestand, welche gestrichelt dargestellt ist, beinhaltet zwei Siebstufen (10.1, 10.2) und für die beiden Partikelbereichesfraktionen 6/12 und 12/50 mm je zwei kaskadierte Reiniger- bzw. Rougher-Stufen (12.1 bis 12.4) zur KSP-Abtrennung sowie Rückgewinnungs- bzw. Scavenger-Stufen (12.5, 12.6). Ergänzt wurde dieser Prozess durch die grün eingefärbte Sortierstufe (12.7, 12.8) mit UV/VIS-Transmissionssensorik und separater Abtrennung für Glaskeramikscherben (MK7) in einen ersten Abweiseweg (A1) und KSP-Partikel (MK6) in einen zweiten Abweiseweg (A2). Im Durchlauf (DL) verbleibt das Glasscherbenkonzentrat MIX-Produkt (MK1 bis MK3). Insbesondere von Vorteil ist die getrennte Ausschleusung der Störstoffe. Dadurch kann die KSP-Abweisefraktion direkt der bestehenden Rückgewinnungsstufe zugeführt und dort weiter aufbereitet werden. Die Verfahrenserweiterung soll an Hand von Versuchsergebnissen nachfolgend näher erörtert werden.

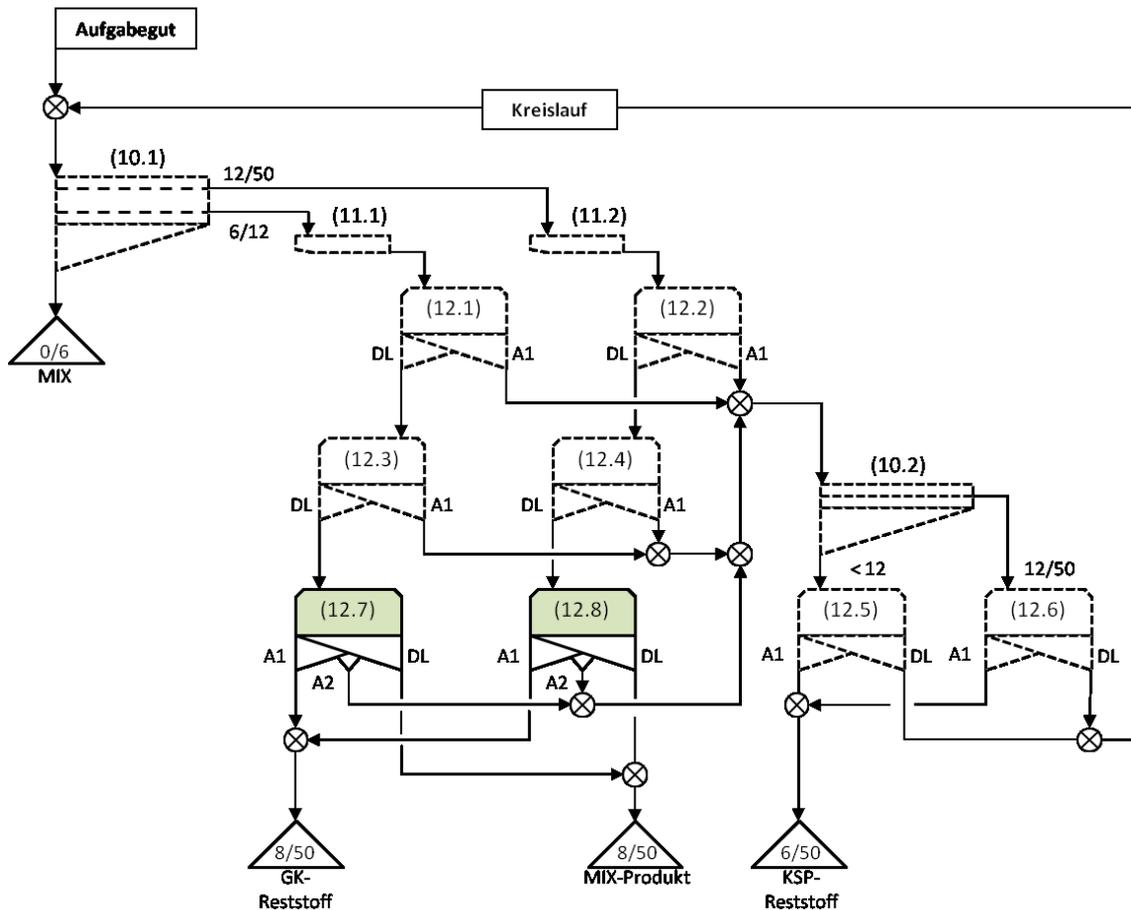


Abbildung 156: Prozessschema mit nachgelagerter KSP- und Glaskeramik-Abtrennung

10.1.3.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsserie wurde auf einem seriennahen CLARITY-Testsystem mit UV/VIS-Transmissionssensorik im Technikum der Fa. Binder+Co AG und Vorort durchgeführt. Als Probenmaterial (Hohlglas-02/2010⁴¹) für die Technikumsversuche wurde eine anlagenkonditionierte und sensorgestützt sortierte Glasscherbenfraktion (12.3-DL, 12.4-DL) beige stellt. Die installierte Voraufbereitung verfügt über keine Trockenwäsche und das Aufgabegut ist leicht feucht (H_2O -Gehalt $\sim 2\%$) sowie oberflächlich etwas verschmutzt. Die Merkmalsklassen wurden anhand von Musterscherben definiert und darauf basierend das Testsystem entsprechend der jeweiligen Sortieraufgabe parametrier⁴². Die grobe Merkmalsklassenzuordnung der Proben erfolgte mittels visueller Bewertung bzw. Handklaubung. Bei Bedarf wurden einzelne Scherben mit einem RFA-Handspektrometer⁴³ analysiert.

⁴¹ Interne Probenbenennung von Binder+Co AG

⁴² MMI-SW: V 1.9.1.2, Sortierrechner-SW: V 1.4.8

⁴³ RFA-Handspektrometer Niton XL3 der Fa. Thermo

10.1.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Aus einer Reihe von Versuchen wurde beispielhaft je Partikelbereich ein Ergebnissatz in Tabelle 63 und Tabelle 64 dargestellt.

| Aufgabe: Misch-Glas (DL-12.3), 6/12 mm | | | |
|---|----------------|---------------|-----------------|
| | M [g] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1, MK2, MK3 | 101 980 | 99,98 | |
| MK6 | 16,5 | 0,02 | 162 |
| MK7 | 8,7 | 0,01 | 86 |
| Summe | 102 005 | 100,0 | |

| | | | |
|----------------------|-----------------------|------|--------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | 95 | [sec] |
| 12.7 - A1: MK7 (GK) | Kapazität auf 480mm: | 3,86 | [t/h]. |
| 12.7 - A2: MK6 (KSP) | Kapazität auf 1000mm: | 8,05 | [t/h] |

| | Auswurf 1 (A1) | | | | Auswurf 2 (A2) | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,A2}$ [%] | $g_{i,A2}$ [g/t] | $r_{i,A2}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1, MK2, MK3 | 860,4 | 99,07 | | 0,84 | 3819,6 | 99,62 | | 3,75 | 97 300 | 100,00 | | 95,41 |
| MK6 | 0,0 | 0,00 | | 0,00 | 14,4 | 0,38 | 3755 | 87,27 | 2,1 | 0,00 | 21,6 | 12,73 |
| MK7 | 8,1 | 0,93 | 9326 | 92,78 | 0,0 | 0,00 | | 0,00 | 0,6 | 0,00 | 6,5 | 7,22 |
| Summe | 868,5 | 100,00 | | | 3834,0 | 100,00 | | | 97302,7 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 0,85 | | | | 3,76 | | | | 95,39 | | | |

Tabelle 63: Versuchsergebnis zu Pos. 12.7 – Kornbereich 6/12 mm

| Aufgabe: Misch-Glas (DL-12.4), 12/50 mm | | | |
|--|-----------------|---------------|-----------------|
| | M [g] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1, MK2, MK3 | 170894,0 | 99,97 | |
| MK6 | 12,8 | 0,01 | 74,9 |
| MK7 | 41,1 | 0,02 | 240,4 |
| Summe | 170948,0 | 100,00 | |

| | | | |
|----------------------|-----------------------|------|--------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | 123 | [sec] |
| 12.8 - A1: MK7 (GK) | Kapazität auf 480mm: | 5,00 | [t/h]. |
| 12.8 - A2: MK6 (KSP) | Kapazität auf 1000mm: | 10,4 | [t/h] |

| | Auswurf 1 (A1) | | | | Auswurf 2 (A2) | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,A2}$ [%] | $g_{i,A2}$ [g/t] | $r_{i,A2}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1, MK2, MK3 | 870,1 | 95,63 | | 0,51 | 3764,4 | 99,71 | | 2,20 | 166260,0 | 100,00 | | 97,29 |
| MK6 | 0,0 | 0,00 | | 0,00 | 10,9 | 0,29 | 2887 | 85,16 | 1,9 | 0,00 | 11,4 | 14,84 |
| MK7 | 39,8 | 4,37 | 43741 | 96,84 | 0,0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 1,3 | 0,00 | 7,8 | 3,16 |
| Summe | 909,9 | 100,00 | | | 3775,3 | 100,00 | | | 166263,2 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 0,53 | | | | 2,21 | | | | 97,26 | | | |

Tabelle 64: Versuchsergebnis zu Pos. 12.8 – Kornbereich 12/50 mm

Aus den dargestellten Versuchsdaten zu Pos.12.7 (Tabelle 63) und Pos.12.8 (Tabelle 64) ergeben sich für die beiden getrennt sortierten Partikelbereiche bezüglich Glaskeramik hohe Abscheidegrade bzw. Inhaltsausbringenswerte ($r_{MK7,12.7-A1}$, $r_{MK7,12.8-A1}$) von 92,78 % und 96,84 %. Berücksichtigt man die sehr geringen Übersortierungswerte ($r_{MK1,MK2,MK3,12.7-A1}$, $r_{MK1,MK2,MK3,12.8-A1}$) von 0,84 % und 0,51 % der Wertstoffklasse, so lassen sich sehr hohe

Trennungsgrade⁴⁴ von ca. 92 % und 96 % für beide Partikelbereiche errechnen. Im Vergleich dazu liegen die Trennungsgrade bezüglich KSP (MK6) mit ca. 83 % und 82 % etwas darunter. Dies ist im Wesentlichen auf einen Selektionseffekt und der Konzentration trenntechnisch schwieriger Störstoffteile in der Durchlaufraction durch die vorgelagerten Sortierstufen zurückzuführen. Aus Erfahrung des Autors und anderen Versuchsreihen kann man mit einer Reduktion des Abscheidegrads AG_{KSP} von etwa 5 % je Sortierstufe rechnen. Zudem wurde auch eine den Wertstoffverlust begrenzende Systemparametrierung gewählt. Die KSP- und GK-Gehalte der Produkte ($g_{KSP,12.7-DL}$, $g_{KSP,12.8-DL}$, $g_{GK,12.7-DL}$, $g_{GK,12.8-DL}$) liegen unter den Kundenvorgaben und auch im Bereich der BVSE-Qualitätsstandards.

In Folge der positiven Versuchsergebnisse und des vorgeschlagenen einfachen Lösungskonzepts wurde die Anlagennachrüstung realisiert. In Abbildung 157 ist dazu die Aufgabesituation mit den beiden installierten Sortiermaschinen vom Typ „CLARITY 10/3“ und die durchaus komplexe Abgabesituation mit sechs Materialströmen dargestellt.



Abbildung 157: Anlageninstallation von Sortiersystemen mit GK- und KSP-Trennfunktion

Auf Grund des geringen Masseausbringens ($r_{m,12.7-A1}$, $r_{m,12.8-A1}$) von deutlich kleiner 1 % bzw. unter 100 kg/h können zur Sammlung des GK-Auswurffraction (12.7-A1, 12.8-A1) kleine Auffangbehälter (gelb) eingesetzt werden. Diese werden in den Produktionspausen entleert. Der KSP-Auswurffractionen (12.7-A2, 12.8-A2) werden in einer Schurre zusammengeführt und in die Altbestandsanlage gefördert. Die MIX-Produktfraktionen bzw. Fertigscherben (12.7-DL, 12.8-DL) werden auf einem querverlaufenden Förderband gesammelt und in das Produktlager transportiert.

⁴⁴ errechnet aus Tabelle nach Formel 5.10

Auf Basis der Auswertung von Anlagenbeprobungen konnte der Sortierprozess hinsichtlich Durchsatzleistungen und Trennungsgraden verfahrenstechnisch, insbesondere für den wesentlichen Partikelbereich 12/50 mm und mit Haftkorn verunreinigtes Scherbengut, auch im Anlagenbetrieb bestätigt werden. In Abbildung 158 sind beispielhaft handsortierte Proben der KSP-Auswurffrac tion (a) und GK-Auswurffrac tion (b) sowie eine ungewaschene Probe der GK-Auswurffrac tion (c) dargestellt.



Abbildung 158: Anlagentest – Probenbeispiele

Wie aus der fotografischen Darstellung (c) gut abzuleiten ist, sind die Scherben mit Haftkorn verunreinigt. Aufgrund der Haftkornverunreinigung, welche auch die sensorische Differenzierung erschwert, gestaltet sich eine visuell-basierte Trennung nach der Glasart dadurch schwierig. Es empfiehlt sich daher, die Proben vor der Handklaubung zu waschen (b). Zur Absicherung der manuellen Merkmalsklassenzuordnung wurden die „verdächtigen“ Scherben mittels RFA-Handspektrometer analysiert und die chemische Zusammensetzung, insbesondere der TiO_2 - und/oder ZrO -Gehalt, geprüft.

Entsprechend dem allgemeinen Trend in der Altglasaufbereitung, zunehmend auch Partikel < 6 mm sensorgestützt zu sortieren, wurde ein feinkornspezifischer Sortierer mit örtlich hochauflösender UV/VIS-Transmissionssensorik entwickelt. Mit dieser Maschinenvariante wurden zwecks Kenndatenermittlung partikelgrößenbezogene Versuchsreihen durchgeführt. Die aufbereiteten Ergebnisse dazu sind in Tabelle 65 dargestellt. Als Aufgabegut wurde aufbereitetes Mischglas der Partikelgrößenbereich 4/15 mm verwendet und im VIS-Bereich transparente bzw. wenig gefärbte glaskeramische Testscherben mit definierter Kontur und Größe beigegeben. Die dargestellten Daten zeigen für alle getesteten Partikelgrößenklassen sehr hohe Abscheidegrade bei sehr geringen Übersortierungswerten bezüglich Kalknatron-Silikatglasscherben. Beispielsweise liegt für 3 mm große Glaskeramikpartikel der Abscheidegrade bei 86 % und die Übersortierung bei 2,9 %. Daraus ergibt sich ein noch

guter Trenngrad von 83,1 %. Insbesondere diese hohen Trennungsgradwerte im Feinkornbereich zeichnen die Technik aus und werden mit anderen technischen Lösungen, wie beispielsweise röntgen-basierten Sortierern bis dato nicht erreicht. Mit dieser Variantenentwicklung konnte eine aufbereitungstechnische Lücke geschlossen werden, da insbesondere Glaskeramikpartikel > 3 mm schmelztechnisch problematisch sind (114).

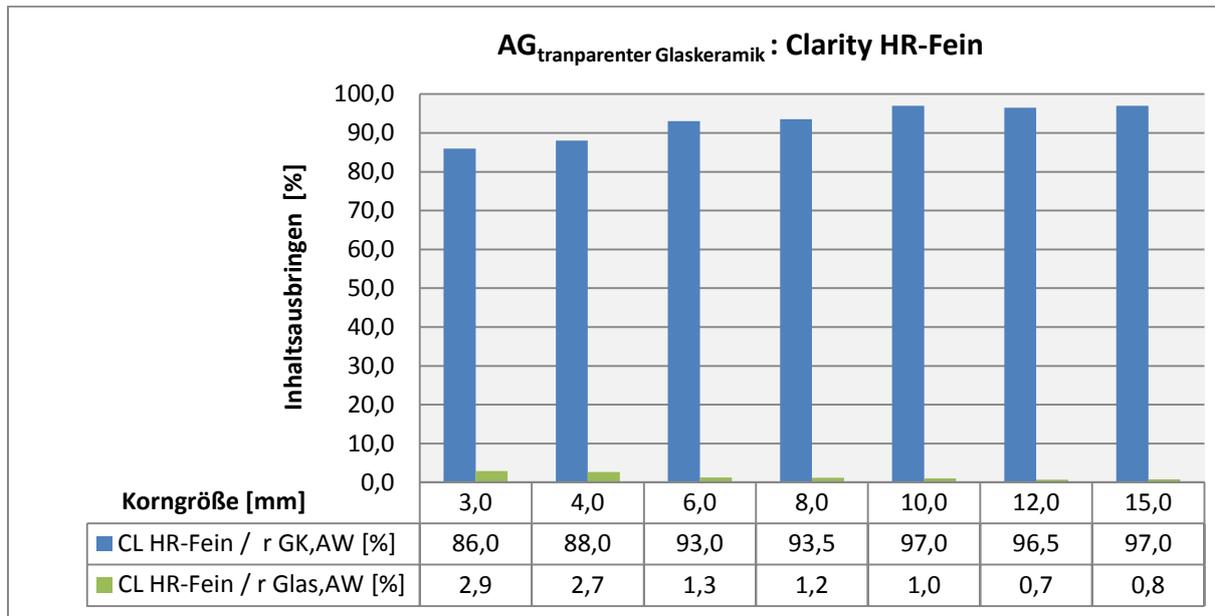


Tabelle 65: GK-Abscheidegrad vs. Glasverlust von CLARITY® bezogen auf Partikelgrößenklassen

Seit Markteinführung der Sortiertechnik mit UV/VIS-Transmissionssensorik wurden unterschiedlichste Verfahrens- und Integrationskonzepte realisiert. Vorzugsweise werden dabei Glaskeramik- und KSP-Partikel über denselben Abweiseweg ausgeschleust. Dies bedingt allerdings in Fall von Kreislaufprozessen, wie beispielsweise in Abbildung 156 dargestellt, eine entsprechende sensorische Aus- bzw. Umrüstung der Sortierer in der Rückgewinnungsstufe. Ergänzend zum erörterten Fallbeispiel sei dazu auf die im Anhang D dargestellten Verfahrensvarianten verwiesen.

10.1.4 Blei-Silikatglas-Abtrennung aus Weißglas

Blei-Silikatglas bzw. Bleiglas ist überwiegend unbunt und transparent. Dies ist auch der Grund, dass bei farbgetrennter Sammlung im Wesentlichen das Weißglasrohgut mit Bleiglas verunreinigt ist und bei farbgemischter Sammlung durch eine sensorgestützte farbliche Trennung eine Anreicherung der Bleiglasscheren im Weißglasprodukt erfolgt. Aus der betrieblichen Praxis ist bekannt, dass hoher und jahrelanger Recyclingscherbeneinsatz ohne

Bleiglasabtrennung - insbesondere bei der Weißglasproduktion - zu einer stetigen Erhöhung des PbO-Gehalts in der neuen Produktion führt. Im nächsten Fallbeispiel wird deshalb die sehr häufige Aufgabenstellung bzw. Verfahrensvariante bezüglich Bleigehaltsreduktion von Weißglasfraktionen oder Weißglasscherbenprodukten erörtert.

10.1.4.1 Verfahrenskonzept

In Abbildung 159 ist dazu ein realisiertes Verfahrensbeispiel dargestellt. In diesem Fallbeispiel wurde eine bestehende Anlage zur Aufbereitung von vorwiegend farbgetrennter Sammelware in Deutschland nachgerüstet.

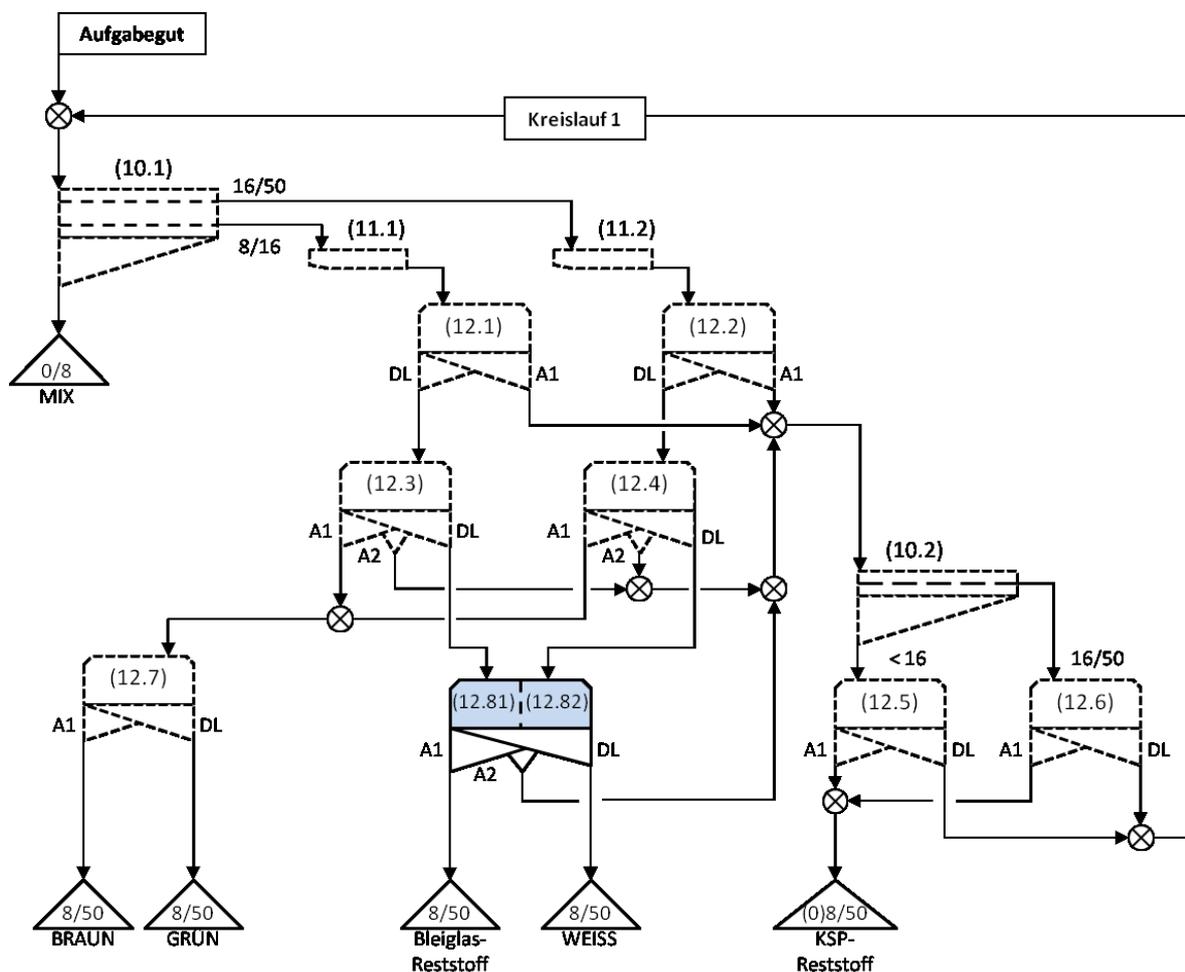


Abbildung 159: Prozessschema mit nachgelagerter Bleiglas- und KSP-Abtrennung

Ergänzend zu den gestrichelt dargestellten Bestandsmaschinen wurde eine Sortiermaschine (12.8) mit Lumineszenz- und VIS-Transmissionssensorik, wie in 9.2.3 diskutiert, installiert. Dem Sortierprozess ist eine klassische Voraufbereitung ohne Trockenwäsche vorangestellt. Das dargestellte Verfahren repräsentiert die Funktionsweise des Sortierprozesses im Fall der

Aufbereitung von Weißglasrohgut mit einem Weißglasscherbengehalt von > 90 %. Die Verschaltung und Maschinenparametrierung wird für die Aufbereitung anderer Rohscherben aus der Grünglas- oder Braunglassammlung entsprechend umgestellt. Die Aufgabeleistung auf die Sortiermaschine Pos. 12.8 beträgt etwa 18 t/h und teilt sich etwa je zur Hälfte auf die beiden separat geführten Partikelbereiche 8/16 und 16/50 mm auf. Die Aufgabenstellung kann mittels nur einer geteilten Maschine mit einer Gesamtsortierbreite von 1.400 mm erfüllt werden. Wiederum sollten nach Möglichkeit auch KSP- und farbliche Verunreinigungen im Produkt nochmals reduziert werden. Dazu ist die Sortiermaschine (12.8) bzw. deren Effektorik mit zwei separaten Ventilleisten bzw. Abweisewegen ausgeführt. Die Bleiglasscherben (MK8) werden im ersten Abweiseweg (12.8-A1), KSP-Partikel (MK6) im zweiten Abweiseweg (12.8-A2) abgetrennt. Im Durchlauf verbleibt das Weißglasscherbenkonzentrat (WEISS; MK1). Von Vorteil ist auch dabei eine getrennte Ausschleusung der Störstoffe. Dadurch kann die KSP-Abweisefraktion direkt der bestehenden Rückgewinnungsstufe und der Bleiglasreststoff gegebenenfalls direkt einer stofflichen Wiederverwertung in der Bleiglasindustrie zugeführt werden. Die Verfahrenserweiterung soll an Hand von Versuchsergebnissen nachfolgend näher erörtert werden.

10.1.4.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsserie wurde auf einem seriennahen CLARITY-Testsystem mit Lumineszenz- und VIS-Transmissionssensorik im Technikum der Fa. Binder+Co AG durchgeführt und die Ergebnisse Vorort im Rahmen des Abnahmeverfahrens bestätigt. Als Probenmaterial (Hohlglas-15/2013⁴⁵) für die Technikumsversuche wurde eine anlagenkonditionierte und sensorgestützt sortierte Glasscherbenfraktion (12.3-DL, 12.4-DL) beige stellt. Da die installierte Voraufbereitung über keine Trockenwäsche verfügt, ist das Aufgabegut leicht feucht (H₂O-Gehalt ~ 2 %) und oberflächlich leicht verschmutzt. Die Merkmalsklassen wurden anhand von Musterscherben definiert und darauf basierend die Ergebnisauswertung abgestimmt sowie das Testsystem entsprechend der aufzugebenden Partikelbereiche parametriert⁴⁶. Die Analyse der Ergebnisproben erfolgte mittels Handklaubung unter UV-Licht und RFA-Handspektrometer⁴⁷ zwecks Bestimmung des PbO-Gehalts einzelner Bleiglasscherben.

⁴⁵ Interne Probenbenennung von Binder+Co AG

⁴⁶ MMI-SW: V 1.9.1.2, Sortierrechner-SW: V 1.4.8

⁴⁷ RFA-Handspektrometer Niton XL3 der Fa. Thermo.

10.1.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Aus einer Reihe von Versuchen wurde beispielhaft je Partikelbereich ein Ergebnissatz in Tabelle 66 und Tabelle 67 dargestellt. In Hinblick auf eine praxistaugliche Funktionsbewertung, wie beispielsweise für Abnahmeverfahren erforderlich, wurde die Bleiglasklasse (MK8) bei der Analyse und Ergebnisdarstellung unterteilt in Bleigläser mit einem PbO-Gehalt von $< 0,5\%$ ($MK8_{<0,5\%}$) und mit einem PbO-Gehalt von $> 0,5\%$ ($MK8_{>0,5\%}$). Diese Unterteilung ist einerseits der geringen Relevanz von Scherben mit geringem PbO-Gehalt ($MK8_{<0,5\%}$) in Bezug auf den PbO-Gehalt des gesamten Scherbenguts und andererseits der begrenzten Detektorempfindlichkeit geschuldet.

| Aufgabe: Weiß-Zwischenprodukt 8/16 mm, (DL-12.3) | | | |
|---|----------------|---------------|-----------------|
| | M [g] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1 | 82808,0 | 99,75 | |
| MK6 | 5,0 | 0,01 | 60,2 |
| MK8$>0,5\%$ | 165,5 | 0,20 | 1993,6 |
| MK8$<0,5\%$ | 37,2 | 0,04 | 448,1 |
| Summe | 83015,7 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | 75,0 | [sec] |
|-----------------------------------|-----------------------|------|--------|
| 12.81 - A1: MK8 (Bleiglas) | Kapazität auf 480mm: | 4,0 | [t/h]. |
| 12.81 - A2: MK6 (KSP) | Kapazität auf 1000mm: | 8,3 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | Auswurf 2 (A2) | | | | Durchlauf (DL) | | | | |
|----------------------------------|--------------|----------------|------------------|----------------|--------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,A2}$ [%] | $g_{i,A2}$ [g/t] | $r_{i,A2}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1 | 163,0 | 46,57 | | 0,20 | 145,0 | 96,80 | | 0,18 | 82500,0 | 99,98 | | 99,63 |
| MK6 | | | | | 4,8 | 3,20 | 32043 | 96,00 | 0,2 | 0,00 | 2 | 4,00 |
| MK8$>0,5\%$ | 156,8 | 44,80 | | 94,74 | | | | | 8,7 | 0,01 | 105 | 5,26 |
| MK8$<0,5\%$ | 30,2 | 8,63 | | 81,18 | | | | | 7,0 | 0,01 | 85 | 18,82 |
| Summe | 350,0 | 100,00 | | | 149,8 | 100,00 | | | 82515,9 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 0,42 | | | | 0,18 | | | | 99,40 | | | |

Tabelle 66: Versuchsergebnis zu Pos. 12.81 – Partikelbereich 8/16 mm

| Aufgabe: Weiß-Zwischenprodukt 16/50 mm, (DL-12.4) | | | |
|--|-----------------|---------------|-----------------|
| | M [g] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1, | 106066,4 | 99,46 | |
| MK6 | 1,4 | 0,00 | 13 |
| MK8$>0,5\%$ | 418,2 | 0,39 | 3921 |
| MK8$<0,5\%$ | 159,8 | 0,15 | 1498 |
| Summe | 106645,7 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | 81 | [sec] |
|-----------------------------------|-----------------------|-----|--------|
| 12.82 - A1: MK8 (Bleiglas) | Kapazität auf 480mm: | 4,7 | [t/h]. |
| 12.82 - A2: MK6 (KSP) | Kapazität auf 1000mm: | 9,9 | [t/h] |

| Auswurf 1 (A1) | | | | Auswurf 2 (A2) | | | | Durchlauf (DL) | | | | |
|----------------------------------|--------------|----------------|------------------|----------------|-------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [g] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [g] | $g_{i,A2}$ [%] | $g_{i,A2}$ [g/t] | $r_{i,A2}$ [%] | M [g] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1 | 469,5 | 46,97 | | 0,44 | 96,9 | 98,63 | | 0,09 | 105500,0 | 99,95 | | 99,47 |
| MK6 | | | | | 1,4 | 1,37 | 13740 | 100,00 | | | | |
| MK8$>0,5\%$ | 414,4 | 41,46 | | 99,09 | | | | | 3,8 | 0,00 | 36 | 0,91 |
| MK8$<0,5\%$ | 115,6 | 11,57 | | 72,35 | | | | | 44,2 | 0,04 | 418 | 27,65 |
| Summe | 999,5 | 100,00 | | | 98,3 | 100,00 | | | 105548,0 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | 0,94 | | | | 0,09 | | | | 98,97 | | | |

Tabelle 67: Ergebnisse des Versuches zu Pos. 12.82 – Partikelbereich 16/50 mm

Aus den Versuchsdaten zu Pos.12.8 ergeben sich bezüglich Bleiglas der Merkmalsklassen $MK8_{>0,5\%}$ hohe Inhaltsausbringenswerte ($r_{MK8>0,5,12.81-A1}$, $r_{MK8>0,5,12.82-A1}$) von 94,74 % und 99,09 %. Berücksichtigt man die sehr geringen Übersortierungswerte ($r_{MK1,12.81-A1}$, $r_{MK1,12.82-A1}$) von 0,2 % und 0,44 % der Wertstoffklasse (MK1), so ergeben sich noch höhere Trennungsgrade⁴⁸ von ca. 94,5 % und 98,6 % als im - unter 10.1.3 diskutierten - Fallbeispiel bezüglich der Aussortierung von Glaskeramik. Diese hohen Trennungsgrade unterstreichen die gute Selektivität der Lumineszenzeigenschaft und gelungene technische Nutzung. Der Gehalt an Bleiglas der Merkmalsklasse $MK8_{>0,5\%}$ konnte massiv von 1.994 auf 105 g/t und von 3.921 auf 36 g/t reduziert werden. Obwohl nicht im Fokus, wurden auch bezüglich der wenig bleihaltigen Scherben der Merkmalsklasse $MK8_{<0,5\%}$ gute Abscheidegrade von 81,18 und 72,35 % erreicht. Insgesamt lagen die Bleiglas- und die KSP-Gehalte beider Produktfraktionen ($g_{KSP,12.7-DL}$, $g_{KSP,12.8-DL}$, $g_{MK8>0,5,12.81-DL}$, $g_{MK8>0,5,12.8-DL}$) unter den Zielwerten des Interessenten bzw. Kunden. Die hohe Sortiergüte lässt sich auch aus Abbildung 160 gut ableiten. In der fotografisch dargestellten Bleiglas-Reststofffraktion (a) liegen die blau lumineszierenden Bleiglasscherben aufkonzentriert mit einem Gehalt von 41,5 % vor. Im Vergleich dazu sind in der Produktfraktion auch visuell keine oder nur sehr kleine Bleiglasscherben zu erkennen.

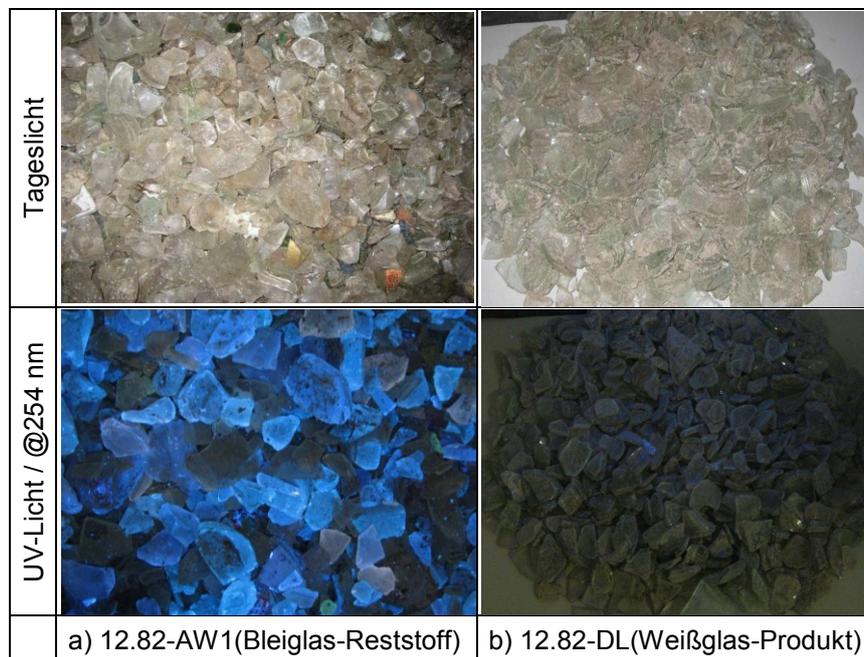


Abbildung 160: Fotografische Darstellung der Versuchsergebnisse Pos. 12.82 - Partikelbereich 16/50 mm

⁴⁸ errechnet aus den Tabellenwerten nach Formel 5.10

Im Rahmen der Validierung des Sortierverfahrens in Bezug auf die BVSE-Qualitätsstandards wurde mittels RFA-Handspektrometer der Bleioxidgehalt der einzelnen Bleiglasscherben aus beiden Versuchschargen bzw. des Partikelbereichs 8/50 mm gemessen. Darauf basierend wurden die Bleiglasklassenverteilungen innerhalb der Trennprodukte und der Aufgabefraktion errechnet sowie mittels Bilanzierungsmethoden eine rechnerische Abschätzung der praktisch realistischen Bleigehaltsreduktion durchgeführt.

Es wurden dazu zehn Bleioxidgehaltsklassen ($MK8.i$, $i = 1$ bis 10) definiert und deren Gehalte ($Gehalt\ MK8.i$) sowie die PbO-Gehaltsbeiträge bzw. die klassenbezogenen PbO-Gehalte ($PbO\text{-}Gehalt * MK8.i$ ⁴⁹) berechnet. Die daraus abgeleitete Merkmalsklassenverteilung und die PbO-Gehaltsverteilung der Bleiglasscherbenmenge aus der Aufgabeprobe ist in Tabelle 69 dargestellt. Die Verteilung zeigt Häufungen von Scherben mit geringen ($MK8.1$, $MK8.2$) und sehr hohen ($MK8.8$, $MK8.9$) PbO-Gehalten. Bedingt durch den kleinen mittleren PbO-Gehalt von $MK8.1$ und $MK8.2$ ist deren PbO-Gehaltsbeitrag mit 0,6 % und 0,9 % aber gering. Dies unterstreicht die geringe Relevanz dieser Merkmalsklassen in Hinblick auf eine signifikante Bleioxid- bzw. Bleireduktion. Die Analysen verschiedenster Proben haben ergeben, dass die Klassenverteilung herkunftsabhängig variiert, aber der Gehalt an Scherben mit PbO-Gehalt von 3 bis 15 % zumeist gering ist.

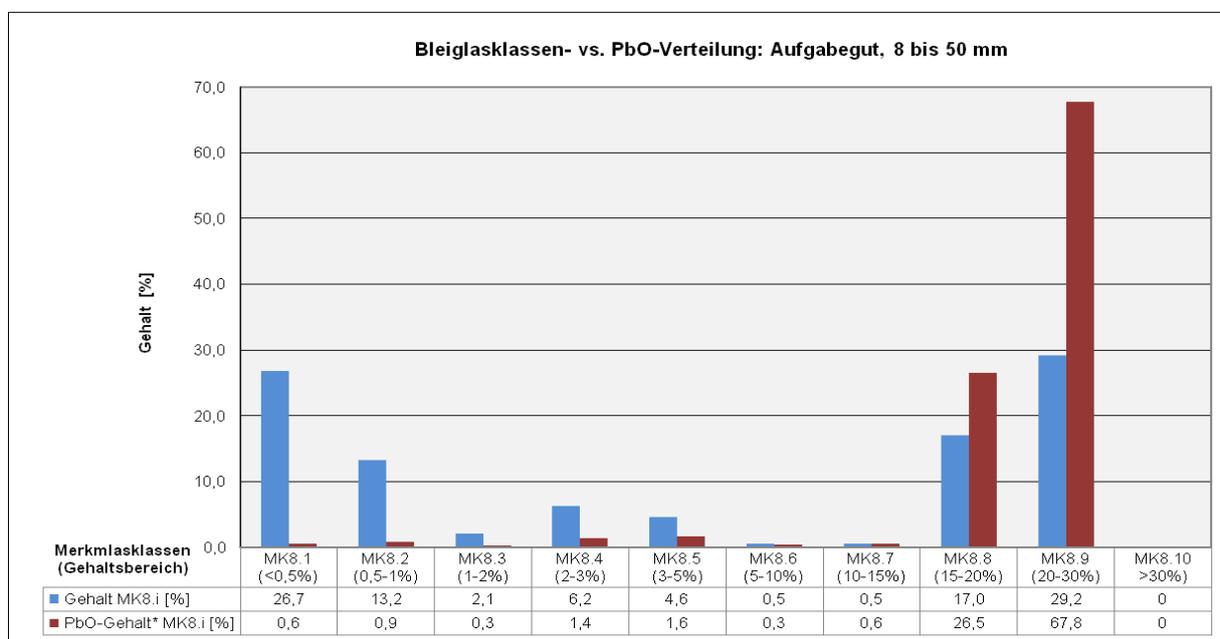


Tabelle 68: Bleiglasklassen– vs. PbO-Verteilung innerhalb der Bleiglassmenge aus der Aufgabefraktion

⁴⁹ $PbO\text{-}Gehalt * MK8.i = \frac{Masse_{PbO, MK8.i}}{Masse_{PbO, 0}}$

In Tabelle 69 ist die Merkmalsklassenverteilung des Aufgabeguts und des Durchlaufs bzw. WEISS-Produkts gegenübergestellt und gibt die Versuchsergebnisse gehaltsspezifisch nochmals detaillierter wieder. Im WEISS-Produkt kommen im Wesentlichen nur mehr gering bleioxidhaltige Scherben (MK8.1, M8.2) mit einem kumulativen Gehalt von ca. 90 % (Gehalt MK8,1 DL + Gehalt MK8,2 DL) vor.

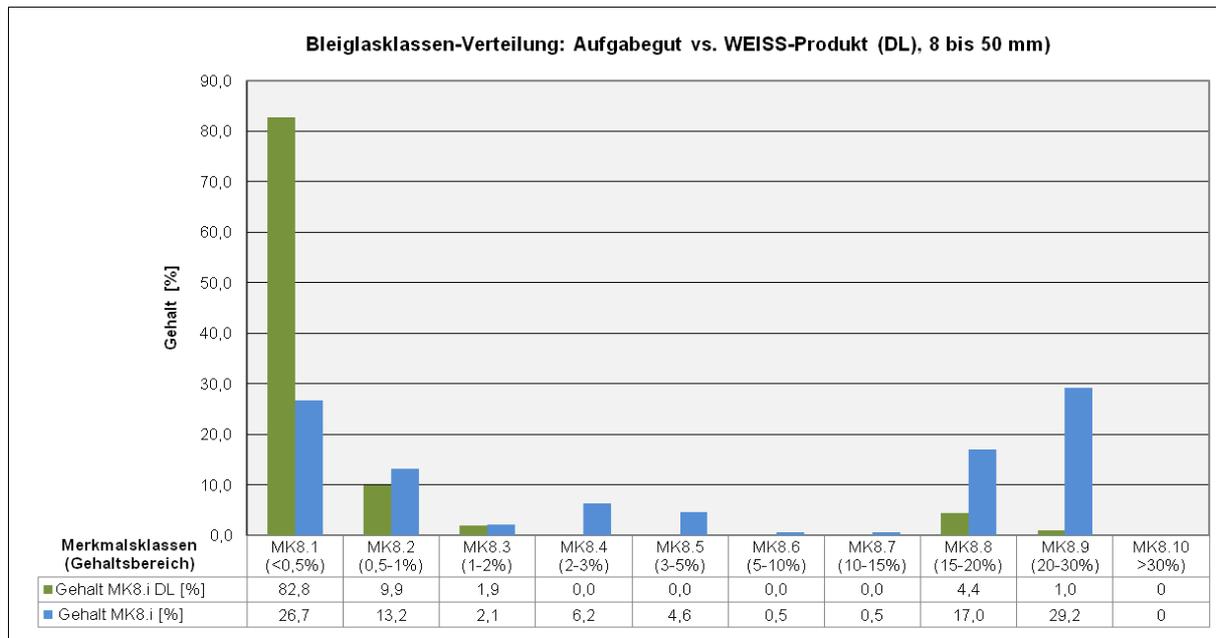


Tabelle 69: Bleiglassklassen-Verteilung innerhalb der Bleiglasscherbenmenge aus der Aufgabefraktion vs. Produktfraktion

Auf Basis der Analyse- und Versuchsdaten wurden verschiedene Gehaltswerte, insbesondere die PbO- und Pb-Gehalte des Aufgabeguts und der Trennprodukte, berechnet. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 70 dargestellt.

| Fraktion (8-50 mm) | Bleiglas <0,5% PbO (MK8.1) | | Bleiglas >0,5% PbO (MK8.2 bis MK8.10) | | Bleiglas >0,1% PbO (MK8.1 bis MK8.10) | | | | | |
|--------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| | Bleiglas-gehalt [g/t] | PbO-Gehalt (Bleiglas) [%] | Bleiglas-Gehalt [g/t] | PbO-Gehalt (Bleiglas) [%] | Bleiglas-gehalt [g/t] | PbO-Gehalt (Bleiglas) [%] | PbO-Gehalt [ppm] | Pb-Gehalt [ppm] | m _{PbO} [g] | r _{Pb,j} [%] |
| AW | 108 040 | 0,25 | 423 268 | 15,24 | 531 308 | 12,19 | 64 788 | 60175 | 74,2 | 98,9 |
| DL | 272 | 0,25 | 66 | 6,55 | 339 | 1,33 | 5 | 4,6 | 0,82 | 1,1 |
| Aufgabe | 1 039 | 0,25 | 3 078 | 14,87 | 4 116 | 11,19 | 461 | 428 | 75,0 | 100,0 |

Tabelle 70: Berechnete Gehaltswerte von Merkmalsklassengruppen und der Versuchsproben

Der PbO-Gehalt konnte demnach - bei Einbeziehung der gesamten Bleiglasmenge (Bleiglas $>0,1\% \text{ PbO}$, MK8.1 bis MK8.10) - von 461 auf 5 ppm reduziert werden. Dies ergab für den gesamten betrachteten Partikelbereich - unter Berücksichtigung des stöchiometrischen Zusammenhangs - einen rechnerischen Bleigehalt von nur 4,6 ppm im Produkt und ein sehr hohes Blei-Inhaltsausbringen $r_{\text{Pb,AW}}$ von 98,8 %. In Hinblick auf den Schwermetall- bzw. Bleigehaltsrichtwert von $< 200 \text{ ppm}$ für Recyclingscherben in den BVSE-Qualitätsstandards ist allerdings anzumerken, dass normales Behälterglas bzw. die Scherbenfraktionen aus Kalknatron-Silikatglas (MK1, MK2, MK3), wie aus eigener Erfahrung und Analysen in Deutschland (115) bekannt ist, bereits einen mittleren Bleigehalt von bis zu 150 ppm aufweisen. Zu diesem Grundgehalt ist der Bleigehalt in Folge des Bleiglaseintrags zu addieren. Auch wenn der Trennungsgrad, wie im Versuch und in der Praxis dargestellt werden konnte, bezüglich Bleiglas aller relevanten Gehaltsklassen hoch ist, ist die Zielerreichung des angegebenen Richtwertes von $< 200 \text{ ppm}$ wesentlich vom Grundniveau mitbestimmt. Entsprechend können aus diesem Grund auch nur bleiglasscherben- bzw. merkmalsklassenbezogenen Trennungsgrade - anstelle von Bleigehaltswerten - garantiert werden.

Die Größenordnung der analysierten Bleigehaltsreduktion und ein stabiles niedriges Bleigehaltsniveau in Bereich des Grundgehalts wurden durch kontinuierliche Qualitätsanalysen des Anlagenbetreibers bestätigt. Diese spezifische sensorfusions-basierte Sortiertechnik ist mittlerweile bereits dutzendfach in der Altglasaufbereitung im Partikelbereich 3/50 mm erfolgreich im Einsatz.

10.2 Industriemineralsortierung

Im Unterschied zur Altgalasaufbereitung besteht seitens der Aufbereiter von mineralischen Rohstoffen überwiegend die Anforderung, neue Einsatzmöglichkeiten für die sensorgestützte Sortierung zu validieren und zu entwickeln. Dabei steht die Integration und Kombination mit etablierten bzw. bekannten Aufbereitungsverfahren an erster Stelle. Entsprechend interaktiv und intensiv muss der Erfahrungsaustausch in der Machbarkeitsprüfungsphase betrieben werden sowie die Zusammenarbeit generell zwischen Maschinenbauern und Aufbereitern bei der Lösungsfindung sein. Dies gilt auch für die beiden im folgenden Abschnitt beispielhaft diskutierten Einsatzmöglichkeiten für lumineszenz-basierte Sortierer mit Sensorfusionssensorik. Mit den beiden Interessenten aus sehr unterschiedlichen Rohgutbereichen wurden teilweise über Jahre verschiedene Einsatzoptionen für sensorbasierte Sortierer entwickelt und validiert.

10.2.1 Trennung von Schwerspat-/Flussspat

Die gegenständliche Fluss- und Schwerspatlagerstätte sowie deren Aufbereitungsanlage befinden sich in Süddeutschland im Schwarzwald. Das Roherz, welches im Wesentlichen aus Schwerspat, Flussspat, Gneis und Quarz besteht, wird im Nahbereich der Aufbereitungsanlage im Teilsohlenweitungsbaue abgebaut und per LKW angeliefert. Zusätzlich zum natürlichen Mineralbestand ist das geförderte Rohgut durch den Abbau des Ausbaumaterials vom Grubengebäude durch bewehrten Spritzbeton verunreinigt. Während als Wertminerale Flussspat (Fluorit, CaF_2) und Schwerspat (Baryt, BaSO_4) anzusehen sind, bilden Gneis und Quarz sowie Spritzbeton im Wesentlichen die Gangart. Der Wertmineralgehalt im Roherz liegt bei etwa 50 %. Die Wertmineralverteilung kann abbaubedingt stark schwanken. Es werden jährlich in etwa 160.000 t Roherz gewonnen und aufbereitet (13), (116). In Abbildung 161 ist ein vereinfachter Aufbereitungsstammbaum der gegenständlichen Aufbereitungsanlage dargestellt.

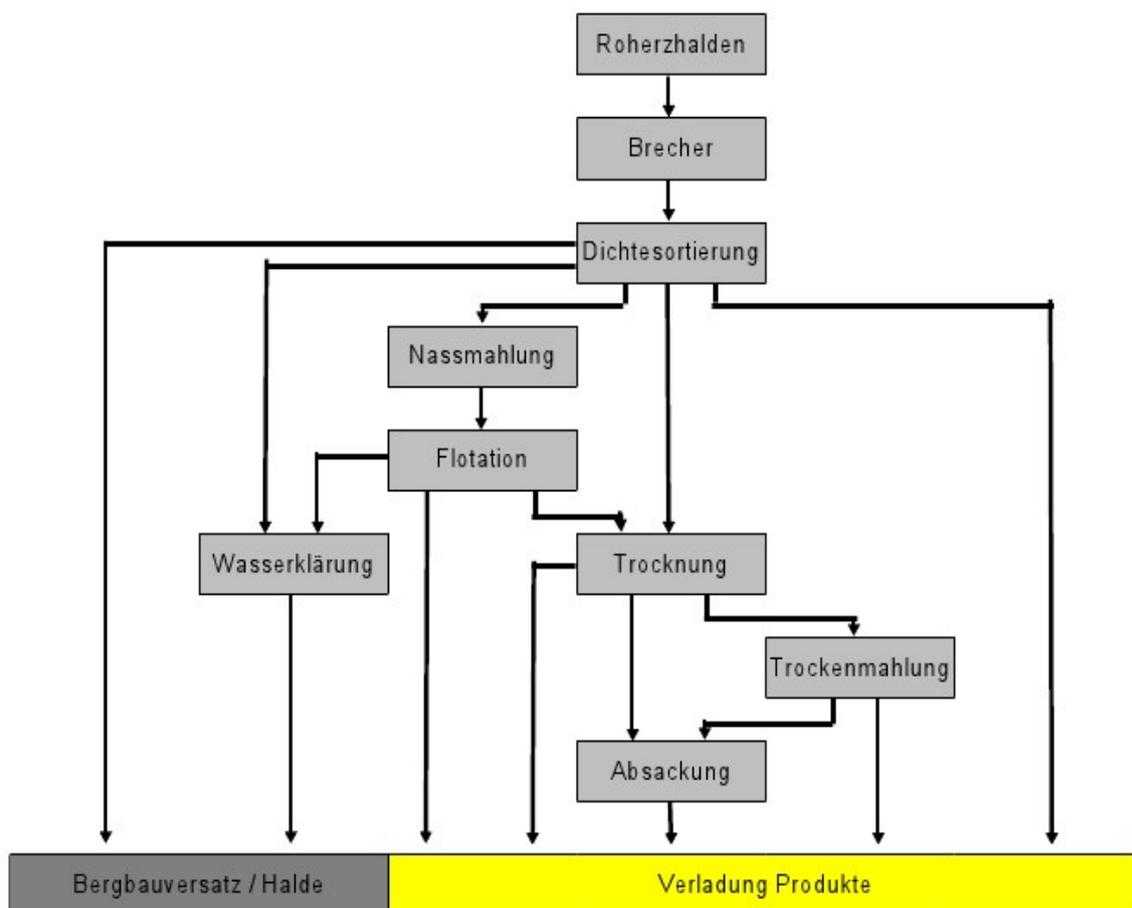


Abbildung 161: Aufbereitungsstammbaum der Schwerspat-/Fluoritaufbereitung (116)

Bei der Aufbereitung von Schwerspat und Flussspat wird meist der große Dichteunterschied zwischen den Wertmineralphasen wie auch zu den Begleitmineralen ausgenützt. Während Flussspat eine Dichte von $3,1 - 3,2 \text{ g/cm}^3$ hat, weist der Schwerspat eine Dichte von $4,5 \text{ g/cm}^3$ auf. Wenn es die Verwachsungsverhältnisse zulassen, sind die beiden Wertminerale daher gut von der Gangart mit einer Dichte von etwa $2,65 - 2,75 \text{ g/cm}^3$ abzutrennen.

In der schematisch dargestellten Aufbereitungsanlage wird diese Trennung (*Dichtesortierung*) nach Vorzerkleinerung (*Brecher*) und Klassierung des Rohguts mittels Tri-Flo-Scheidern und Wendelscheidern verwirklicht. Die Fraktion $1,2/16 \text{ mm}$ wird einer ersten Tri-Flo-Scheiderstufe aufgegeben. Auf dieser wird bei einer Dichte von ca. $2,7 \text{ g/cm}^3$ die spezifisch leichtere Gangart vom spezifisch schwereren Fluss-/Schwerspat-Bauschkonzentrat getrennt. In einer zweiten Stufe erfolgt die Trennung in ein flussspatreiches und ein schwerspatreiches Vorkonzentrat bei einer Dichte von etwa $3,4 \text{ g/cm}^3$. Die so erhaltenen Vorkonzentrate werden in Trommelmühlen (*Nassmahlung*) zerkleinert und anschließend der Flotation zugeführt. Die Fraktion $< 1,2 \text{ mm}$ wird auf Wendelscheidern vorkonzentriert und ebenfalls den Flotationskaskaden zugeführt (13), (117).

Eine aufbereitungstechnische Herausforderung stellt dabei die z.T. starke Porosität der Fluoritkörner dar. Durch die dadurch resultierenden Abnahmen der Dichten der Körner kann es zu starken Verlusten an Flussspat kommen. Der Schluss liegt daher nahe, alternative oder ergänzende Aufbereitungsmethoden aufzuzeigen (118). Dazu wurden Untersuchungen zum Einsatz sensorgestützter Sortiertechnik durchgeführt (13).

Seitens Binder+Co AG wurden gemeinsam mit dem Betreiber der Aufbereitungsanlage in mehreren Phasen verschiedene Einsatzoptionen für die sensorgestützte Sortierung validiert. Hierbei ergaben sich aus unterschiedlichen Zielsetzungen und prozessbedingt vier konkrete Aufgabenstellungen:

- Bergevorabscheidung des Taubgesteins (überwiegend Gneis und Quarz)
- Abtrennung dunkler Sulfide aus dem Schwerspat-Vorkonzentrat
- Nachsortierung des Schwerspat-Vorkonzentrats nach der Dichtesortierung
- Rückgewinnung von porösen Flussspatkörnern aus einer Splitt-Fraktion

Neben der einfachen VIS- und der komplexeren NIR-basierten Sortierung wurde in einer letzten Phase die Sortierung mittels lumineszenz-basierter Sensorfusionssensorik auf Einsatztauglichkeit geprüft. Weingrill hat in seiner Diplomarbeit insbesondere Ergebnisse zur Bergevorabscheidung und Abtrennung von Sulfiden mittels VIS-basierter Sortierung dargestellt (13). Die Nachsortierung des Schwerspat-Vorkonzentrats mittels lumineszenz-basierter Sensorfusionssensorik soll im folgenden Abschnitt erörtert werden.

10.2.1.1 Sortiergut- und Zielqualitäten

Das Aufgabegut M002/2013, bei welchem es sich um ein Schwerspat-Vorkonzentrat nach der Dichtentrennung handelt, besteht vorwiegend aus kristallinen Flussspat- und Schwerspatkörnern, die in freier sowie verwachsener Form vorliegen. In Abbildung 162 sind dazu fotografisch die relevanten Merkmalsklassen dargestellt. In Hinblick auf eine Darstellung des Differenzierungsvermögens der Sortiertechnik in Bezug auf Verwachsungen wurden neben den Reinmineralklassen (MK1, MK4) zwei Verwachsungsklassen (MK2, MK3) definiert. Als Zuordnungsgrenze zwischen den beiden Verwachsungsklassen wurde ein Verhältnis von 30 zu 70 bzw. ein Flussspatanteil von $> 30\%$ (MK2) festgelegt. Die qualitative Bewertung der Verwachsungsverhältnisse und Klassenzuordnung erfolgt visuell unter UV-Licht auf Basis der spezifischen Lumineszenzeigenschaften der Minerale. Der kristalline Flussspat aus dieser Lagerstätte emittiert bei UVA-Lichtanregung im Unterschied zum Schwerspat blaues Lumineszenzlicht. Im Detail wurden die Lumineszenzeigenschaften dieses Rohguts bereits in 8.3.5.3 erörtert.

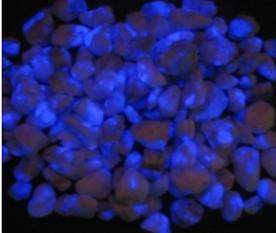
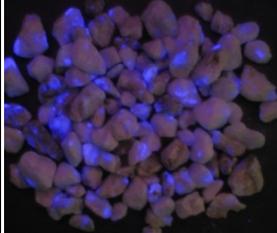
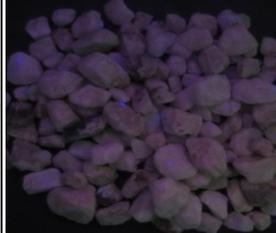
| | | | | |
|--------------|---|---|--|---|
| Tageslicht |  |  |  |  |
| UV-Lampe@366 |  |  |  |  |
| | MK1: Flussspat (CaF ₂) – weiß-transparent, leicht verfärbt | MK2: Verwachsung > 30% CaF ₂ | MK3: Verwachsung < 30% CaF ₂ | MK4: Schwerspat (BaSO ₄) – weiß, leicht verfärbt |

Abbildung 162: Merkmalsklassenobjekte unter Tages- und UV-Licht der Rohgutprobe M002

Mittels Sortierung soll einerseits das Schwerspat-Vorkonzentrat qualitativ verbessert und andererseits ein flotierbares Flussspat-Vorkonzentrat erzeugt und Flussspat rückgewonnen werden. Der Gehalt an Schwerspat im Flussspat-Vorkonzentrat soll geringer als 15 % sein.

10.2.1.2 Verfahrenskonzept

Das Verfahrenskonzept, welches Basis für die Simulation und Versuchsreihen war, ist dazu in Abbildung 163 dargestellt. Bereits installierte Aggregate sind gestrichelt dargestellt.

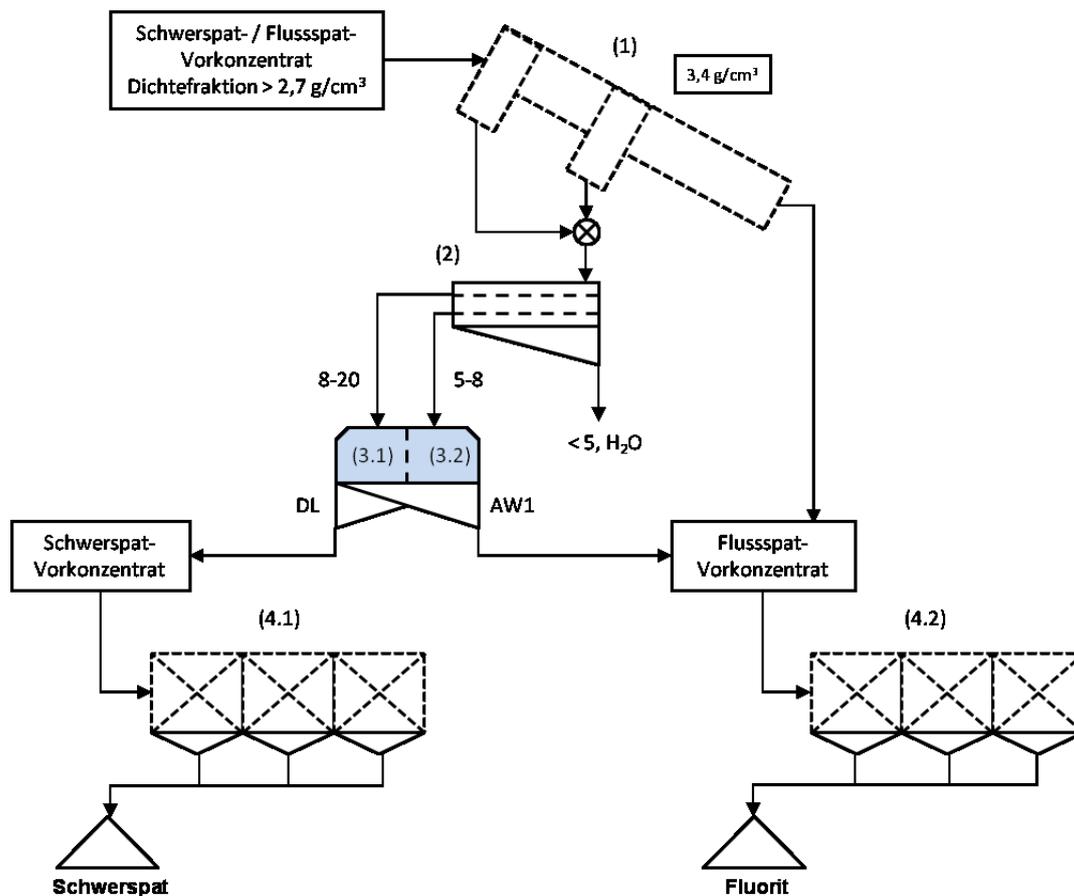


Abbildung 163: Verfahrensschema zur Nachsortierung des Schwerspat-Vorkonzentrates

Nach dem vorgeschlagenen Verfahrenskonzept wird das Schwerspat-Vorkonzentrat, welches nach der zweiten Tri-Flo-Scheiderstufe (1) nass vorliegt, unmittelbar vor der Sortierung mittels einer Spezialsiebmaschine (2) klassiert und entwässert. Dieser Konditionierungsschritt dient insbesondere der Optimierung der Transporteigenschaften auf der Materialrutsche im Sortiersystem. Die Kornfraktionen 5/8 mm und 8/20 mm werden anschließend auf einen geteilten Sortierer (3) aufgegeben, welcher im Wesentlichen verwachsene Körner mit hohem Fluoritanteil aussortiert. Die Trennprodukte werden nach der Sortierung den entsprechenden Flotationskaskaden (4) zugeführt.

10.2.1.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsserie wurde auf einem MINEXX-Funktionsmuster mit frontangeregter Lumineszenz/NIR-Transmissionssensorik im Technikum der Fa. Binder+Co AG durchgeführt. Der Versuchsaufbau und Detailansichten sind dazu in Abbildung 164 fotografisch dargestellt. Die Sensorfusionssensorik - entsprechend dem Aufbau in 9.2.4 / Abbildung 151 - wurde aufgabenspezifisch mit

- Bandpassfilter - Transmissionsbereich von 420 bis 500 nm,
- Beamsplitter – Grenzwellenlänge bei 500 nm,
- Objekt- bzw. LED-Hintergrundbeleuchtung – Emissionsmaximum bei 880 nm und
- Anregungsbeleuchtung – Emissionsmaximum bei 366 nm

ausgerüstet.

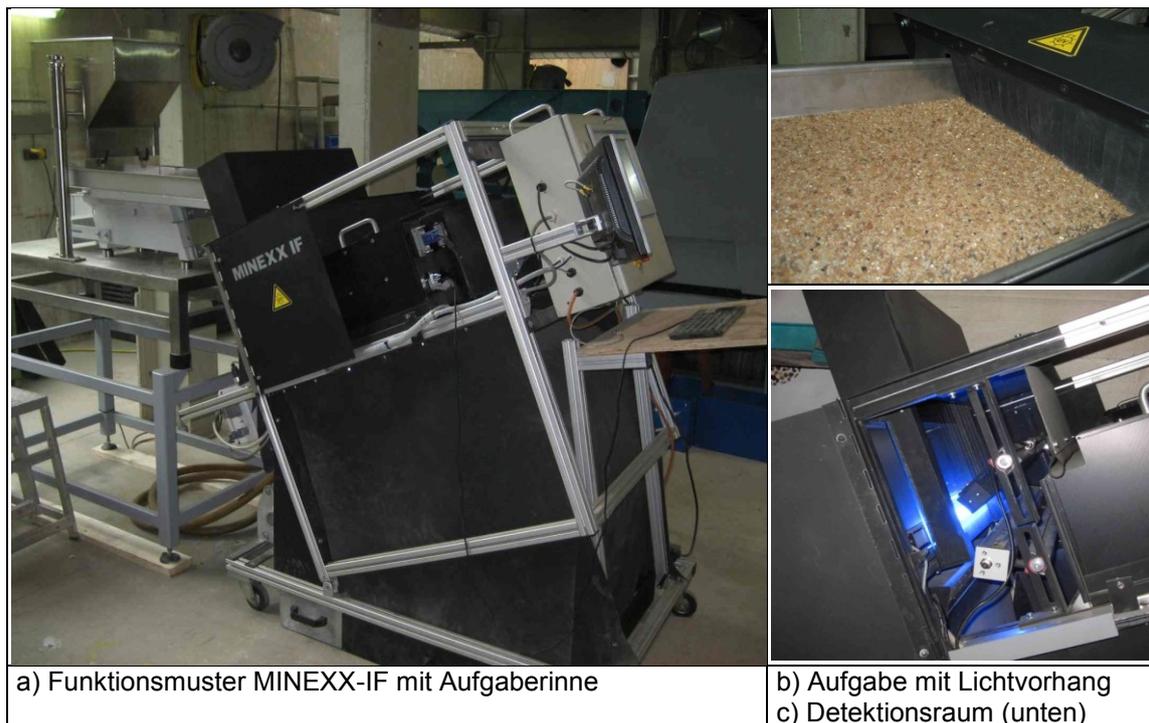


Abbildung 164: Versuchsaufbau mit Funktionsmuster MINEXX-IF

Als Probenmaterial für die Technikumsversuche wurde anlagenkonditioniertes Schwespat-Vorkonzentrat beige stellt. Das Probenmaterial wurde im Technikum klassiert und der H₂O-Gehalt bzw. die Benetzung entsprechend der zu erwartenden Anlagenverhältnisse

eingestellt. Die Merkmalsklassen wurden anhand von Mustern definiert und darauf basierend das Testsystem der jeweiligen Sortierfunktion entsprechend parametrier⁵⁰. Die Analyse der Versuchschargen erfolgte mittels visueller Bewertung bzw. Handklaubung unter UV-Licht und RF-Analyse seitens des Anlagenbetreibers⁵¹.

10.2.1.4 Ergebnisse und Diskussion

Aus einer Reihe von Versuchen wurde beispielhaft je Kornbereich ein Ergebnissatz in Tabelle 71 und Tabelle 72 dargestellt.

| Aufgabe: Schwerspat-Vorkonzentrat, 8/20 mm | | | |
|--|---------------|----------------------|------------------------|
| | M [kg] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| MK1 | 0,176 | 4,27 | |
| MK2 | 0,473 | 11,45 | |
| MK3 | 0,487 | 11,79 | |
| MK4 | 2,993 | 72,49 | |
| Summe | 4,1282 | 100,00 | |

| | | | |
|-------------------------|-----------------------|-----|--------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | --- | [sec] |
| 3.1: AW MK1 +MK2 | Kapazität auf 480mm: | --- | [t/h]. |
| 12.1 - A2: --- | Kapazität auf 1000mm: | --- | [t/h] |

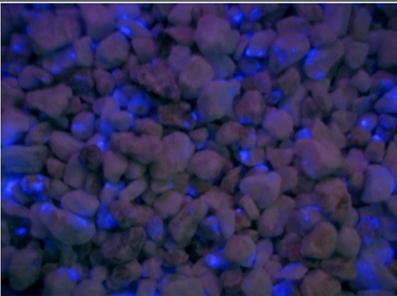
| Auswurf 1 (AW1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|---|--------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|--|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [kg] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [kg] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| MK1 | 0,167 | 20,05 | | 94,82 | 0,009 | 0,28 | | 5,18 |
| MK2 | 0,421 | 50,53 | | 89,07 | 0,052 | 1,57 | | 10,93 |
| MK3 | 0,087 | 10,43 | | 17,86 | 0,400 | 12,13 | | 82,14 |
| MK4 | 0,158 | 18,99 | | 5,29 | 2,834 | 86,03 | | 94,71 |
| Summe | 0,833 | 100,00 | | | 3,295 | 100,00 | | |
| r_{m,j} [%] | | | | 20,19 | | | | 79,81 |
|  | | | | |  | | | |

Tabelle 71: Versuchsergebnis zu Pos. 2.1 – Kornbereich 8/20 mm

⁵⁰ MMI-SW: V 2.6.0.3, Sortierrechner-SW: V 2.8.0

⁵¹ Labor der Sachtleben Bergbau GmbH & Co. KG

| Aufgabe: Schwerspat-Vorkonzentrat 5/8 mm | | | |
|--|--------|---------------|-----------------|
| | M [kg] | $g_{i,0}$ [%] | $g_{i,0}$ [g/t] |
| MK1 | 0,306 | 2,81 | |
| MK2 | 3,263 | 29,98 | |
| MK3 | 3,892 | 35,76 | |
| MK4 | 3,424 | 31,45 | |
| Summe | 10,885 | 100,00 | |

| | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----|--------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | --- | [sec] |
| Test 3.2: AW MK1 +MK2 | Kapazität auf 480mm: | --- | [t/h]. |
| 12.1 - A2: --- | Kapazität auf 1000mm: | --- | [t/h] |

| Auswurf 1 (AW1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|-----------------|--------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | M [kg] | $g_{i,A1}$ [%] | $g_{i,A1}$ [g/t] | $r_{i,A1}$ [%] | M [kg] | $g_{i,DL}$ [%] | $g_{i,DL}$ [g/t] | $r_{i,DL}$ [%] |
| MK1 | 0,288 | 7,32 | | 94,23 | 0,018 | 0,25 | | 5,77 |
| MK2 | 2,992 | 75,93 | | 91,70 | 0,271 | 3,90 | | 8,30 |
| MK3 | 0,583 | 14,79 | | 14,98 | 3,309 | 47,65 | | 85,02 |
| MK4 | 0,077 | 1,96 | | 2,26 | 3,346 | 48,19 | | 97,74 |
| Summe | 3,941 | 100,00 | | | 6,944 | 100,00 | | |
| $r_{m,j}$ [%] | | | | 36,21 | | | | 63,79 |

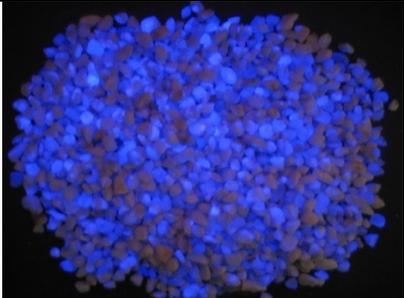
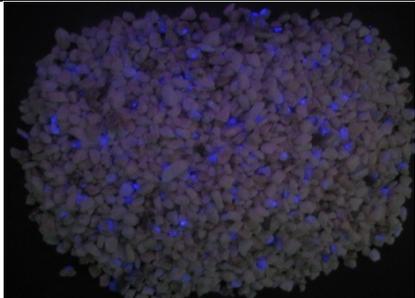



Tabelle 72: Versuchsergebnis zu Pos. 2.1 – Kornbereich 5/8 mm

Aus den Versuchsergebnissen zu Pos. 3.1 und 3.2 lässt sich ein hohes Inhaltsausbringen der auszusortierenden Reinmineralklassen MK1 und MK4 von 94 bis 97 % für beide Kornfraktionen ableiten. Entsprechend hoch sind auch die Trennungsgrade⁵² von etwa 90 % und höher für diese Merkmalsklassen. Auch das Inhaltsausbringen der Verwachsungsklassen MK2 und MK3 zwischen ca. 82 und ca. 92 % ist gut und unterstreicht das Differenzierungsvermögen der Sortiertechnik von definierten Verwachsungsklassen.

Weitere Versuchsreihen haben gezeigt, dass mittels Anpassung der Maschinenparameter auch andere Verwachsungsklassenverhältnisse, wie beispielsweise 50 zu 50 bzw. ein Flussspatanteil von >50 %, sortiertechnisch sehr gut umgesetzt werden können. Eine gewisse Unschärfe ist dabei allerdings der einseitigen zweidimensionalen Abbildung der dreidimensionalen Verwachsungsverhältnisse geschuldet. Eine Verbesserungsoption stellt hier sicher eine zweiseitige Detektion mit verknüpfter Auswertung dar.

⁵² errechnet aus den Tabellenwerten nach Formel 5.10

In Tabelle 73 sind die RF-Analyseergebnisse der Produktproben dargestellt. Der Gehalt an Schwerspat im Schwerspat-Vorkonzentrat konnte demnach um ca. 9 und ca. 7 %-Punkte gesteigert werden. Auch das Inhaltsausbringen von Flussspat ist mit ca. 78 und 79 % in beiden Kornfraktionen gut. Allerdings ist der Gehalt an Schwerspat mit über 50 % im erzeugten Flussspat-Vorkonzentrat deutlich über dem Zielwert von 15 %. Versuchsreihen mit anderen Vorkonzentratproben und/oder Maschineneinstellungen zeigten keine signifikante Auswirkung auf den Schwerspatgehalt im Flussspat-Vorkonzentrat. Dies führt zum Schluss, dass im Wesentlichen die Verwachsungscharakteristik bzw. der zu geringe Aufschluss den realisierbaren stofflichen Trennungsgrad limitieren. Der deutlich höhere Trennungsgrad von ca. 65 % für die Kornfraktion 5/8 mm gegenüber dem Trennungsgrad von 50 % für die Kornfraktion 8/20 mm stützt diese Schlussfolgerung.

| Korn- klasse [mm] | Frak- tion | Masse | | Gehalt | | | Inhalt | | | Inhaltsausbringen | | |
|-------------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | | absolut [kg] | relativ [%] | CaF ₂ [%] | BaSO ₄ [%] | SiO ₂ [%] | CaF ₂ [% ²] | BaSO ₄ [% ²] | SiO ₂ [% ²] | CaF ₂ [%] | BaSO ₄ [%] | SiO ₂ [%] |
| 8 -20 | AW | 3,94 | 36,2 | 22,1 | 64,5 | 7,2 | 800,1 | 2335,3 | 260,7 | 79,2 | 29,0 | 40,5 |
| | DL | 6,94 | 63,8 | 3,3 | 89,7 | 6 | 210,5 | 5722,3 | 382,8 | 20,8 | 71,0 | 59,5 |
| | Aufgabe | 10,89 | 100,0 | 10,11 | 80,58 | 6,43 | 1010,7 | 8057,6 | 643,4 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 5 -8 | AW | 0,83 | 20,2 | 29,1 | 59,5 | 3,8 | 587,5 | 1201,2 | 76,7 | 77,8 | 14,0 | 17,9 |
| | DL | 3,29 | 79,8 | 2,1 | 92,6 | 4,4 | 167,6 | 7390,6 | 351,2 | 22,2 | 86,0 | 82,1 |
| | Aufgabe | 4,13 | 100,0 | 7,55 | 85,92 | 4,28 | 755,1 | 8591,8 | 427,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

Tabelle 73: Bilanz der Versuche 2.1 und 2.2 auf Basis von RF-Analysen

Obwohl in Bezug auf die definierten Merkmalsklassen MK1 bis MK4 eine hohe Sortiereffizienz gegeben ist, konnte für diesen Anwendungsfall daher kein verfahrenstechnischer bzw. wirtschaftlicher Vorteil durch den Einsatz der sensorgestützten Sortierung dargestellt werden.

10.2.2 Konzentration von Rohrubinen und Korunden

Im letzten validierten Fallbeispiel wird die lumineszenz-basierte Sortierung zur Herstellung eines Rohrubinkonzentrats behandelt. Die Rohgutherkunft, der Mineralbestand und die spezifischen Lumineszenzeigenschaften wurden in 8.3.5.7 bereits erörtert. Herausfordernd bei dieser Anwendungsmöglichkeit sind der geringe Gehalt an Wertmineralen bzw. Rubinen und Korunden im Aufgabegut, welches im Wesentlichen aus Quarzsand und –schotter besteht, sowie der Feuchtegehalt in Folge der nass betriebenen Vorkonzentration mittels Dichtentrennung, bei der der Wertmineralgehalt von ca. 0,01 % im Rohgut auf maximal 0,5 % im Vorkonzentrat angereichert wird. Der H₂O-Gehalt wird mit 15 bis 20 % angenommen. Die Aufgabeeleistung für die Sortierung wurde mit ca. 4,5 t/h definiert.

10.2.2.1 Sortiergut- und Zielqualitäten

Nach der Dichtesortierung sind im Aufgabegut M115/2014 Rohrubine (MK1) und Korunde (MK2), welche in 8.3.5.7 / Abbildung 140 fotografisch dargestellt sind, in der oben angeführten geringen Konzentration in einer Mischung aus Quarzsand und -schotter (MK3) eingebettet. Unter UVA-Licht emittieren sowohl Rubine als auch Korunde ein typisch intensiv rotes Lumineszenzlicht. Die Gangart weist keine merkliche Lumineszenz auf. Als funktionelle Zielsetzung hat die Maximierung des Inhaltsausbringens über das ganze Verfahren die oberste Priorität. Zudem soll – als zweitrangige Vorgabe - der Wertmineralgehalt einzelner Kornklassenkonzentrate jeweils über 10 % liegen.

10.2.2.2 Verfahrenskonzept

Der Verfahrensvorschlag als Basis für die Simulation und Validierung beinhaltet, wie in Abbildung 165 dargestellt, einen Fließbettrockner (1), eine Spezialsiebmaschine (2) und mehrere geteilte lumineszenz-basierte Sortierer (3 bis 6). Diese bilden die Kernkomponenten des Verfahrenskonzepts.

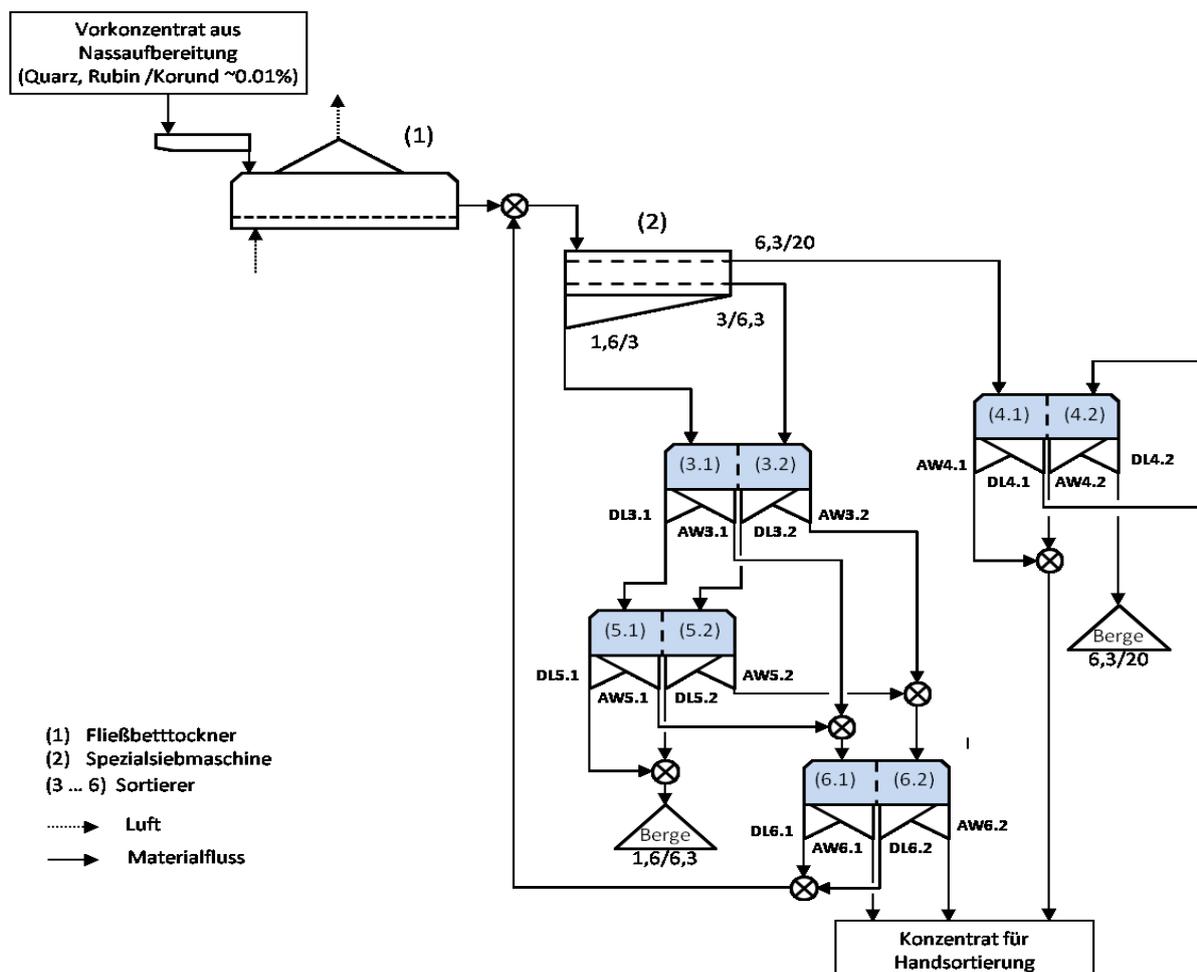


Abbildung 165: Verfahrensvorschlag zur Aufkonzentration von Rohrubinen und Korunden

Im vorgeschlagenen Konzept wird der Feuchtegehalt mittels eines energieoptimierten Fließbettrockners auf unter 1 % reduziert und dabei entstaubt. Dies dient zur Optimierung der Transport- und Vereinzlungseigenschaften der feinkörnigen Fraktion 1,6/20 mm. Die Trocknung ist wesentlich sowohl für hohe Sieb- als auch Sortiereffizienz. Eine Spezialsiebmaschine produziert die Aufgabefraktionen 6,3/20 mm, 3,15/6,3 mm und 1,6/3,15 mm. Auf Basis von Siebanalysen ist von einem Mengenverhältnis von 30/40/30 auszugehen. Dieses Splitting unterstützt die Trennschärfemaximierung und begründet sich auch in einer differenzierten kornklassenseparaten Weiterverarbeitung der aussortierten Wertstoffprodukte. Da möglichst hohes Inhaltsausbringen der Wertminerale gefordert ist, werden alle drei Aufgabefraktionen einer ersten (3.1, 3.2, 4.1) und anschließend der Durchlauf jeweils einer zweiten Sortierstufe (5.1, 5.2, 4.2) zugeführt. In beiden Sortierstufen werden die Wertmineral Körner aktiv aussortiert und getrennt zwischengelagert. Die Durchlaufprodukte der Sortierer der zweiten Sortierstufe bilden zusammen die Bergefraktion 1,6/20 mm. Die Auswurffraktionen der ersten und zweiten Sortierstufe der beiden feinkörnigen Fraktionen werden kornklassenseparat einer dritten Stufe – einer Cleanerstufe – zugeführt. Diese sortiert aktiv übersortiertes Nebengestein aus und stellt finale Konzentrate für eine Qualitätsklassentrennung per Hand her.

10.2.2.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsserien wurden auf einem MINEXX-Funktionsmuster mit frontangeregter Lumineszenz/NIR-Transmissionssensorik im Technikum der Fa. Binder+Co AG durchgeführt. Die Sensorfusionssensorik - entsprechend dem Aufbau in 9.2.4 / Abbildung 151 - wurde aufgabenspezifisch mit

- Bandpassfilter - Transmissionsbereich von 500 bis 700 nm,
- Beamsplitter – Grenzwellenlänge bei 700 nm,
- Objekt- bzw. LED-Hintergrundbeleuchtung – Emissionsmaximum bei 880 nm und
- Anregungsbeleuchtung – Emissionsmaximum bei 366 nm

ausgerüstet.

Als Probenmaterial für die Technikumsversuche wurde ein anlagenkonditioniertes Vorkonzentrat beige gestellt. Das Probenmaterial wurde im Technikum getrocknet und klassiert. Die Merkmalsklassen wurden anhand von Mustern definiert und darauf basierend das

Testsystem der jeweiligen Sortieraufgabe entsprechend parametrier⁵³. Die Analyse der Versuchschargen erfolgte mittels visueller Bewertung bzw. Handklaubung unter UV-Licht.

10.2.2.4 Ergebnisse und Diskussion

Aus einer Reihe von Versuchen ist beispielhaft je Kornbereich ein Ergebnissatz in Tabelle 74, Tabelle 75 und Tabelle 76 dargestellt.

| Aufgabe: Vorkonzentrat 6,3/20 mm | | | |
|----------------------------------|--------|----------------------|------------------------|
| | M [g] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| MK1 * MK2 | 32,0 | 0,43 | 4333 |
| MK3 | 7354,0 | 99,57 | |
| Summe | 7386 | 100,00 | |

| | | | |
|----------------------------------|-----------------------|-----|--------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | --- | [sec] |
| Test 1.1: AW MK1 +MK2 (Pos. 4.1) | Kapazität auf 480mm: | --- | [t/h]. |
| 12.1 - A2: --- | Kapazität auf 1000mm: | --- | [t/h] |

| Auswurf 1 (AW1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [kg] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| MK1 * MK2 | 32,0 | 55,17 | | 100,00 | 0,0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| MK3 | 26,0 | 44,83 | | 0,35 | 7328,0 | 100,00 | | 99,65 |
| Summe | 58 | 100,00 | | | 7328 | 100,00 | | |
| r _{m,i} [%] | | | | 0,79 | | | | 99,21 |

Tabelle 74: Versuchsergebnis zu Pos. 4.1 – Kornbereich 6,3/20 mm

| Aufgabe: Vorkonzentrat 3/6,3 mm | | | |
|---------------------------------|--------|----------------------|------------------------|
| | M [g] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| MK1 * MK2 | 7,3 | 0,11 | 1101 |
| MK3 | 6602,0 | 99,89 | |
| Summe | 6609,2 | 100,00 | |

| | | | |
|----------------------------------|-----------------------|-----|--------|
| Prozessfunktion: | Zeit: | --- | [sec] |
| Test 2.1: AW MK1 +MK2 (Pos. 3.2) | Kapazität auf 480mm: | --- | [t/h]. |
| 12.1 - A2: --- | Kapazität auf 1000mm: | --- | [t/h] |

| Auswurf 1 (AW1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [kg] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| MK1 * MK2 | 7,2 | 9,97 | | 98,90 | 0,08 | 0,00 | 12 | 1,10 |
| MK3 | 65,0 | 90,03 | | 0,98 | 6537,0 | 100,00 | | 99,02 |
| Summe | 72,2 | 100,00 | | | 6537,08 | 100,00 | | |
| r _{m,i} [%] | | | | 1,09 | | | | 98,91 |

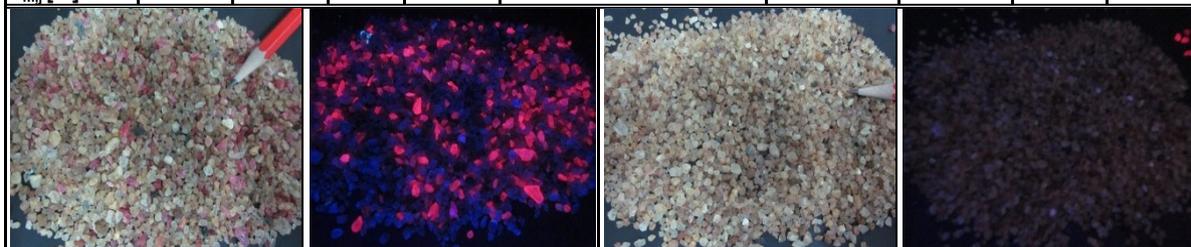


Tabelle 75: Versuchsergebnis zu Pos. 3.2 – Kornbereich 3/6,3 mm

⁵³ MMI-SW: V 2.6.0.3, Sortierrechner-SW: V 2.8.0

| Aufgabe: Vorkonzentrat 1,6/3 mm | | | |
|---------------------------------|--------|----------------------|------------------------|
| | M [g] | g _{i,0} [%] | g _{i,0} [g/t] |
| MK1 * MK2 | 4,1 | 0,12 | 1183 |
| MK3 | 3494,7 | 99,88 | |
| Summe | 3498,8 | 100,00 | |

| Prozessfunktion: | Zeit: | --- | [sec] |
|----------------------------------|-----------------------|-----|--------|
| Test 3.1: AW MK1 +MK2 (Pos. 3.1) | Kapazität auf 480mm: | --- | [t/h]. |
| 12.1 - A2: --- | Kapazität auf 1000mm: | --- | [t/h] |

| Auswurf 1 (AW1) | | | | | Durchlauf (DL) | | | |
|----------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | M [g] | g _{i,A1} [%] | g _{i,A1} [g/t] | r _{i,A1} [%] | M [kg] | g _{i,DL} [%] | g _{i,DL} [g/t] | r _{i,DL} [%] |
| MK1 * MK2 | 3,9 | 7,89 | | 94,93 | 0,21 | 0,01 | 61 | 5,07 |
| MK3 | 45,9 | 92,11 | | 1,31 | 3448,8 | 99,99 | | 98,69 |
| Summe | 49,83 | 100,00 | | | 3449,01 | 100,00 | | |
| r _{m,j} [%] | | | | 1,42 | | | | 98,58 |

Tabelle 76: Versuchsergebnis zu Pos. 3.2 – Kornbereich 1,6/6,3 mm

Aus den dargestellten Daten zur ersten Rougherstufe (3.1, 3.2, 4.1) errechnen sich sehr gute Trennungsgrade⁵⁴ von 93,6 %, 98 % und 99,65 %. Der signifikante optische Eigenschaftsunterschied, der sehr gute Aufschluss über alle Kornfraktionen und die Leistungsfähigkeit der neu entwickelten fluoreszenz-basierten Sortiertechnik führen zu diesem exzellent Ergebnis.

In weiteren Versuchsreihen wurden auch die nachgelagerten Sortierstufen experimentell simuliert. Die Erkenntnisse aus den Versuchen dienen in weiterer Folge als Basis für eine rechnergestützte Simulation mit der Prozesssimulationssoftware IDEAS® mit graphischer Bedienoberfläche. Aus dem Ergebnis der Simulation, welches im Original in Anhang M dargestellt ist, wurde eine Bilanz abgeleitet. Demnach sind, wie in Tabelle 77 in kompakter Form dargestellt, für das vorgeschlagene Verfahren Inhaltsausbringenswerte $r_{\text{Wertmineral}}$ von 99,8 % in der Körnung 6,3/20 mm und von 99,2 % in der Körnung 1,6/6,3 mm realistisch. Die Wertmineralgehalte der Konzentrate $g_{\text{Wertmineral}}$ mit Werten von ca. 12 und 44,5 % würden auch die diesbezügliche Zielsetzung erfüllen.

| Kornbereich [mm] | Fraktion | m | rm | g _{Wertmineral} | g _{Gangart} | l _{Wertmineral} | l _{Gangart} | Γ _{Wertmineral} | Γ _{Gangart} |
|---------------------|------------|--------|----------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | | [kg/h] | [%] | [%] | [%] | [% ²] | [% ²] | [%] | [%] |
| 6,3-20 | Berge | 1352,9 | 0,966357 | 0,0009 | 99,9991 | 0,0009 | 96,63 | 0,22 | 97,02 |
| | Konzentrat | 47,1 | 0,033643 | 11,8600 | 88,1400 | 0,3990 | 2,97 | 99,78 | 2,98 |
| | Aufgabe | 1400 | 100,00 | 0,3999 | 99,6001 | 0,3999 | 99,60 | 100,00 | 100,00 |
| 1,6-6,3 | Berge | 2867,7 | 0,988828 | 0,0040 | 99,9960 | 0,0040 | 98,88 | 0,79 | 99,38 |
| | Konzentrat | 32,4 | 0,011172 | 44,5500 | 55,4500 | 0,4977 | 0,62 | 99,21 | 0,62 |
| | Aufgabe | 2900,1 | 100,00 | 0,5017 | 99,4983 | 0,5017 | 99,50 | 100,00 | 100,00 |

Tabelle 77: Bilanz auf Basis von Versuchsergebnissen und rechnergestützter Simulation

⁵⁴ errechnet aus den Tabellenwerten nach Formel 5.10

Auf Basis der Durchführung sowie Auswertung der experimentellen Versuchsreihen im Technikum sowie der rechnergestützten Simulation konnte das vorgeschlagene Sortierverfahren hinsichtlich geforderter Durchsatzleistungen und Trennungsgraden verfahrenstechnisch, insbesondere auch für die Körnung 1,6/6,3 mm, dargestellt werden. Für dieses Aufgabegut und diese Aufgabestellung ist die Lumineszenz-basierte Sortierung sehr gut geeignet.

11 Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel möchte der Autor aus seiner Sicht und Einschätzung einen Einblick auf am Beginn stehende und Ausblick auf zukünftige technische Entwicklungen sowie erweiterte Nutzungsmöglichkeiten, insbesondere mit Bezug auf die Binder+Co AG geplanten Aktivitäten, geben.

Der allgemeinen Trend, immer feinere Körnungen sensorgestützt zu sortieren, setzt sich fort und wird nach Ansicht des Autors auch in den nächsten Jahren ein wesentlicher Innovationstreiber im Bereich der sensorgestützten Sortierung bleiben. So werden vereinzelt bereits Einsatzanfragen beispielsweise für Quarzsand im Kornbereich unter 1 mm validiert und wird sogar die Sortierung von Pulverprodukten angefragt. In Hinblick auf die Lösung dieses Anforderungsschwerpunkts wird insbesondere an neuen Datenverarbeitungsarchitekturen mit Lastverteilungsmanagement zur Bewältigung nochmals höheren Datenmengen geforscht. Die darauf basierende neue Softwaregeneration wird in der Lage sein, bei wesentlich höheren Objektraten, als dies aktuell der Fall ist (~0,5 Millionen Objekte/min), lastunabhängig präzise zu klassifizieren. Zudem wird an einer weiteren Miniaturisierung der Sortierventile und Verstärker als Basis für eine weitere Steigerung der effektorischen Auflösung gearbeitet. Dabei sieht der Autor „on board“ Konzepte, bei denen beispielsweise piezoelektrisch-basierte Ventilarrays direkt auf Platinen montiert sind, als mittelfristig realisierbaren Lösungsansatz.

Mit der Erhöhung der Aktuatoranzahl und der steigenden Komplexität der Sensoriken in den Sortierern geht die Notwendigkeit einer automatisierten Überwachung der Bauteil- sowie Betriebs- und Prozessparameter einher. Dies dient auch dazu, zukünftig sensorgestützte Sortierer als aktive Qualitätssicherungs- und Qualitätssteuerungselemente zu nutzen. Mit ihrer sensorischen und elektronischen Ausrüstung sowie der Vernetzungsmöglichkeiten bieten moderne Sortierer die besten Voraussetzungen in Hinblick auf diese Zusatznutzung. Als Beispiel sei dazu die Herstellung definierter Farbklassenzusammensetzungen im Recyclingglasbereich oder die online-Steuerung der Rohstoffzugabe in Abhängigkeit der Farbzusammensetzung des Recyclingglases bei der Glasherstellung genannt.

Die Integration und Nutzung von immer strahlungsstärkeren, kleineren und in ihren spektralen Eigenschaften vielfältig verfügbaren LED's hat, wie auch in dieser Arbeit gezeigt wurde, bereits die sensorischen Ausprägungen deutlich beeinflusst. Auch dieser Trend wird sich mittelfristig fortsetzen und neue sensorische Lösungswege eröffnen. So wird an einem

Sortierer für Altglas mit Multieigenschaftserfassung gearbeitet, welcher KSP, Glaskeramik, Bleiglas und Glas nach Farbe differenzieren und sortieren kann. Basis dieser Entwicklung sind sequenziell gesteuerte, komplex aufgebaute LED-Zeilennarrays und eine synchronisierte Pixeldatenverarbeitung. Dadurch können - von der allgemeinenameratechnikentwicklung stark entkoppelt - auch mit einfachen monochromatischen Kameras individuelle, spektral mehrkanalige Detektoren realisiert werden.

Basierend auf einer Patentschrift (119) von William R. White aus dem Jahr 1984 wurden Grundlagenuntersuchungen zur Aktivierung von Lumineszenz mittels Aufbringen von bestimmten Chemikalien auf die Oberfläche von beispielsweise magnesiumhaltigen Mineralien begonnen. Als Ursache für diesen Effekt wird der sogenannte CHEF (**C**helated **E**nhanced **F**luorescence) Mechanismus angenommen. Dabei bilden geeignete Fluorophore mit bestimmten Festkörperionen an der Objekt Oberfläche Komplexe, welche unter UV-Licht sehr intensive Lumineszenz zeigen. Ähnliches wird in der medizinischen Analytik als „Tracing“ oder „Marking“ auf mikroskopischer Ebene angewendet. Mittelfristige Intention dieser Grundlagenuntersuchungen ist die Entwicklung einer mineralselektiven Lumineszenzaktivierung mittels Oberflächenbehandlung und anschließende Sortierung.

In einer weiteren Grundlagenstudie wird die Nutzung der LIF (**L**aser **I**nduced **F**luorescence) Technik zur Differenzierung von Kunststoffen untersucht. Dabei kommen die Methoden der erweiterten Rohgutanalyse und ein von Binder+Co AG entwickelter, spezieller LIF-Analyser zum Einsatz, welcher beispielsweise auch für die Klassifizierung von mineralischem Rohgut geeignet ist. Dabei scheint die Abklingzeit der Lumineszenz neben ihrer spektralen Charakteristik zur Differenzierung gut geeignet zu sein (120). In Hinblick auf eine Einzelkornsortierung wird an der Entwicklung von Beleuchtungs- und Anregungsquellen auf Basis von gepulsten Lasersystemen gearbeitet.

Literaturverzeichnis

1. SERI. *Report über europäische und globale Ressourcennutzung - Ohne Mass und Ziel?* [Online] 2009. [Zitat vom: 09. 09 2014.] Seite 9-12, 26-28.
http://old.seri.at/documentupload/SERI%20PR/ohne_mass_und_ziel--2009.pdf.
2. **Berwanger, Mattias und Fietz, Nina.** Sensor-based sorting. [Buchverf.] Karl Nienhaus, Thomas Pretz und Hermann Wotruba (eds.). *Sensor Technologie: Impulses for the Raw Materials Industry*. Aachen : Shaker Verlag, 2014, Bd. 50, 3, S. 35.
3. European Comission - Enterprise and Industry. *Critical raw materials for the EU*. [Online] May 2014. [Zitat vom: 01. Juni 2014.] http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf.
4. **Nooke, Günter.** Internationale Aspekte deutscher Rohstoffpolitik. [Buchverf.] Karl J. Thome-Kozmiensky und Daniel Goldmann. *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, Bd. 7, S. 3-11.
5. EUR-Lex. *Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle*. [Online] [Zitat vom: 19. Mai 2014.] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ>.
6. **Bunge, Rainer und Stäubli, Ariane.** Metall - Reserve, Preis, Umwelt. [Buchverf.] Karl Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann. *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, Bd. 7, S. 272.
7. **Gschaider, Helfried und Huber, Reinhold.** Neue Entwicklungen in der optischen Sortierung. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte- BHM, 153., Heft 6*. 2008, S. 217-220.
8. **Ohnewein, Günter.** *Verwendbarkeit des UV-Cut-Off-Verfahrens als optisches Sortierkriterium im Altglasaufbereitungsprozess*. Sensorbasierte Sortierung, FH JOANNEUM Gesellschaft mbH Graz. Graz, Austria : s.n., 2006. Diplomarbeit.
9. **Glawitsch, Gerhard.** Glassortierung mit Röntgen-Fluoreszenz zur Ausscheidung von Bleiglas und Glaskeramik. [Buchverf.] Thomas Pretz und Hermann Wotruba. *Sensorgestützte Sortierung 2010*. Aachen : GDMB, 2010, Bd. 122, S. 71.
10. **bvse.** www.bvse.de. [Online] Standardblatt T120 / 14. Aug. 2014. [Zitat vom: 11. Feb. 2015.] http://www.bvse.de/342/496/7__Altglas_Qualitaetskriterien__Produktspezifikationen.
11. **Wotruba, Hermann.** Stand der Technik der sensorgestützten Sortierung. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte- BHM, 153., Heft 6*. 2008, S. 221-224.
12. **Wotruba, Hermann, Robben, Mathilde und Kleine, C.** The Development in Sensor-based Sorting for Minerals. [Buchverf.] Thomas Pretz, Hermann Wotruba und Karl Nienhaus (eds.). [Hrsg.] Thomas Pretz, Peter Quicker und Herman Wotruba. *Applications of Sensor-based Sorting in the Raw Material Industry*. Aachen : Shaker Verlag GmbH, 2011, Bd. 42.

13. **Weingrill, Georg Ulrich.** *Zu Fragen der Einsatzmöglichkeiten und -grenzen sensorgestützter Sortiertechnik bei der Aufbereitung mineralischer Schüttgüter.* Leoben : Montanuniversität Leoben, Institut für Aufbereitung und Veredlung, 2013. Diplomarbeit.
14. **Gaft, Michael, Reinfeld, Renata und Panczer, Gérard.** *Luminescence Spectroscopy of Minerals and Material.* Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN-13 978-3-642-06011-3.
15. **Bühler AG.** Optische Sortierung - Homepage der Fa. Bühler. [Online] [Zitat vom: 05. 12 2014.] <http://www.buhlergroup.com/global/de/prozesstechnologien/optische-sortierung.htm>.
16. **Reiser, Andreas, Gößwein, Oliver und Heuer, Dieter.** Chemgapedia - die Online-Enzyklopädie. [Online] Wiley Information Services GmbH, Berlin. [Zitat vom: 06. 12 2014.] <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/wellenoptik/spektrum.vlu.html>.
17. **Pellenc Selective Technologies .** www.pellencst.com. [Online] [Zitat vom: 4. März 2015.] <http://www.pellencst.com/referenzen/>.
18. **Tomra.** www.tomra.com/de. [Online] [Zitat vom: 4. März 2015.] <https://www.tomra.com/de/solutions-and-products/sorting-solutions/recycling/your-challenge/waste-sorting>.
19. **Robben, M. R., et al.** X-ray transmission sorting of tungsten ore. [Buchverf.] Jürgen Beyerer, Fernando Puente León und Thomas Längle. *OCM 2013 - Optical Characterization of Minerals - conferenz proceedings.* Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2013.
20. **BT-Wolfgang Binder GmbH.** www.redwave.at. [Online] [Zitat vom: 4. März 2015.] <http://www.redwave.at/produkte/redwave-xrf/>.
21. **Feierabend, Angelika.** Using LIBS-Spectroscopy for Analysis of Raw Material and Production Waste. [Buchverf.] Thomas Pretz und Hermann Wotruba. *Sensor-Based Sorting 2014.* Aachen : GDMB, 2014, Bd. 135, S. 35-38.
22. **Labbert, M., et al.** Developments in Plastics Sorting Using Microwave Heating and Infrared Detection. [Buchverf.] Thomas Pretz und Hermann Wotruba. *Sensor-Based Sorting.* Aachen : GDMB, 2014, Bd. 135, S. 221-231.
23. **Maul, Anja und Nagel, Michael.** Polymer identification with terahertz technology. *OCM.* Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2013.
24. **Hein, Kristine, et al.** Classifikation of Plastics Using GMM-UBM on High-frequency Data. *Sensor-Based Sorting 2014.* Aachen : GDMB, 2014.
25. **Hering, Ekbert und Martin, Rolf.** *Photonik - Grundlagen, Technologie und Anwendung.* 1. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer, 2006. ISBN-10 3-540-23438-1.
26. **Eichler, Joachim und Eichler, Jürgen.** *Laser - Bauformen, Strahlführung, Anwendungen.* Heidelberg : Springer, 2010. ISBN 978-3-642-10461-9.

-
27. **Askeland, Donald R.** *Materialwissenschaften - Grundlagen, Übungen, Lösungen.* Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 1996. ISBN 978-3-8274-2741-0.
28. **Fasching, Gerhard.** *Werkstoffe für die Elektrotechnik - Mikrophysik, Struktur, Eigenschaften* . 4. Aulage. Wien, New York : Springer, 2005. ISBN 3-211-22133-6.
29. **Gauglitz, Guenter und Vo-Diuanh, Tuan.** *Handbook of Spectroscopie.* Weinheim : WILEY-VCH, 2003. ISBN 3-527-29782-0.
30. Wikipedia. [Online] [Zitat vom: 29. Dezember 2015.]
[https://de.wikipedia.org/wiki/Extinktion_\(Optik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Extinktion_(Optik)).
31. **Scholze, Horst.** *Glas - Natur, Struktur und Eigenschaften.* Dritte, neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag GmbH, 1988. ISBN 978-3-662-07496-1.
32. DIN 1259 - Glas: Begriffe für Glasarten und Glasgruppen. 1986.
33. **Pfaender, Heinz G.** *Schott - Glaslexikon.* 3. überarbeitet Auflage. Landsberg am Lech : s.n., 1986.
34. **Vogel, Werner.** *Glaschemie.* Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1992. ISBN 978-3-662-07500-5.
35. **Kieler, Monika.** *Optische Erkennung bleioxihaltiger Gläser in Recyclingscherben, Diplomarbeit.* TU-Graz. Graz, Austria : TU-Graz, 2010. Diplomarbeit.
36. **Okrusch, Martin und Mathes, Siegfried.** *Mineralogie, Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenlehre.* Würzburg : Springer-Verlag, 2005.
37. **Strunz, Hugo und Nickel, Ernst H.** *Strunz Mierrallogical Tables.* 9. Stuttgart : E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2001. ISBN 3-510-65188-X.
38. **Schumann, Walter.** *Der große BLV Steine- und Mineralienführer.* 7. München : BLV Buchverlag GmbH & Co. KG, 2007.
39. **Gatterer, Karl.** *Solid Stade Spectroscopy - Vorlesungskript zu CHE.578.* Graz : s.n., Sommersemester 2012.
40. **Steffen, Gabriele.** *Farben und Lumineszenz von Mineralien.* Stuttgart : Enke, 2000. ISBN 3-13-118341-1.
41. **Fox, Mark.** *Optische Eigenschaften von Festkörpern.* München : Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, 2012. ISBN 978-3-486-71240-7.
42. Wikipedia. [Online] Created by Mark Somoza March 26 2006, 9. Dezember 2015.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Morse-potential.png>.

43. **Günzler, Helmut und Gremlich, Hans-Ulrich.** *IR-Spektroskopie.* Weinheim : WILEY-VCH, 2003. 978-3-527-30801-9.
44. **Kunzmany, Hans.** *Festkörperspektroskopie - Eine Einführung.* Berlin Heidelberg New York : Springer, 1989. ISBN 978-3-642-74693-2.
45. **Gorobets, Boris S. und Rogojine, Alexandre A.** *Luminescent Spectra of Minerals.* Moscow : RPC VIMS, 2002. ISBN 5-901837-05-3.
46. **Henderson, B. und Imusch, G. F.** *Optical Spectroscopy of Inorganic Solids.* Oxford : Clarendon Press, 1989. ISBN 0-19-851372-0.
47. **Pretz, Thomas und Wotruba, Hermann.** *Sensorgestützte Sortierung 2004.* Aachen : GDMB, 2004. Bd. 100. ISBN 3-935797-15-x.
48. **Richter, Heinrich.** *Einführung in die Farbmeterik.* Berlin : Walter de Gruyter, 1976. ISBN 3-11-004751-9.
49. **Schubert, Heinrich.** *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe.* Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1989. Bd. Band I. ISBN 3-342-00289-1.
50. **Wens, Bastian.** Enrichment of non-ferrous metals from mixed municipal solid waste. [Hrsg.] Karl Nienhaus, Thomas Pretz und Hermann Wotruba. *Sensor Technologies: Impulses for Raw Materials Industry.* Aachen : Shaker, 2014, Bd. 50.
51. **Schubert, Heinrich.** *Aufbereitung fester Stoffe - Band II: Sortierprozesse.* Stuttgart : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie , 1996. Bd. 2. ISBN 3-342-00555-6.
52. **Gschaider, Helfried und Huber, Reinhold.** Different Realied Applications of Sensor-Based Sorting in Mineral Processing. [Buchverf.] Thomas Pretz und Hermann Wotruba. *Sensor-Based-Sorting.* Aachen : GDMB, 2014, Bd. 135, S. 185-192.
53. **Huber, Reinhold.** Staus und Entwicklung der sensorgestützten Sortierung in der Aufbereitung primärer und sekundärer Rohstoffe. [Hrsg.] Helmut Flachberger, et al. *Aufbereitung in Österreich.* Leoben : Eigenverlag, 2010, S. 229-233.
54. **Gschweit, Karlheinzl.** *Vorrichtung zum Sortieren von Abfällen.* EP 0 669 171 A2 EU, 1995. Januar 30.
55. **Anibas, Franz.** *Lineare Sortiereinrichtung.* EP 982083 A2 EU, 17. August 1999.
56. **Berwanger, Mattias und Gaastra, Marina.** Technical and physical principals of sensor technologies appield in the raw materials industry. [Buchverf.] Karl Nienhaus, Thomas Pretz und Hermann Wotruba (eds.). *Sensor Technologie: Impulses for the Raw Materials Industry.* Aachen : Shaker Verlag, 2014, Bd. 50, 4.
57. **Beyerer, Jürgen und Längle, Thomas.** Sensorbeleuchtung, Diodenbeleuchtung, Bildgewinnung. [Hrsg.] Norbert Bauer. *Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung - Qualitätssicherung in der Praxis.* Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2007, 6.

58. **Burger, Wilhelm und Burger, Mark James.** *Digitale Bildverarbeitung - Eine Einführung mit Java und ImageJ.* Berlin : Springer, 2006. ISBN-10 3-540-30940-3.
59. **Aigner, Fritz.** *Sortiereinrichtung.* EP 0 479 756 A2 Austria, 8. April 1992. Sensorkonzept.
60. **Schwider, Peter.** CCD- und CMOS-Bildsensoren. *Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung.* Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2007, 5.
61. **ev2 semiconductors SAS.** Datenblatt 0917C-IMAGE-03/10. *ELiXA UC4/UC8 Line Scan Camera.* 2010.
62. Vision Doktor. [Online] [Zitat vom: 13. Januar 2014.] <http://www.vision-doctor.de>.
63. **Fraunhofer WKI.** www.wki.fraunhofer.de. [Online] [Zitat vom: 13. Januar 2015.] <http://www.wki.fraunhofer.de/de/leistung/vst/projekte/spectral-imaging.html>.
64. **EVK DI Kerschhaggl GmbH .** www.evk.biz. [Online] [Zitat vom: 16. Januar 2015.] <http://www.evk.biz/en/products/helios-hyperspectral-imaging-camera-system/helios-system-configurations/helios-class.html>.
65. **LLA Instruments GmbH.** www.lla.de. [Online] [Zitat vom: 8. April 2016.] http://www.lla.de/files/lla/pdf/Infoschriften%20GER/NIR_Sortiermesstechnik_im_Vergleich.pdf.
66. **Osram.** www.osram.com. [Online] [Zitat vom: 19. Januar 2015.] http://www.osram.com/osram_com/products/lamps/.
67. www.philipslumileds.com. [Online] [Zitat vom: 19. Januar 2015.] <http://www.philipslumileds.com/products/luxeon-rebel/luxeon-rebel-color>.
68. www.polytechnichub.com. [Online] <http://www.polytechnichub.com/what-is-led-light/>.
69. www.lap-laser.com. [Online] [Zitat vom: 21. Januar 2015.] <http://www.lap-laser.com/de/industrie/produkte/projektion/linienlaser/>.
70. www.heraeus-noblelight.com. [Online] [Zitat vom: 21. Januar 2015.] http://www.heraeus-noblelight.com/media/webmedia_local/media/pdf/ip/products_6/irfrindustrie/irstrahlerfrdieindustrie.pdf.
71. **Insort GmbH.** www.insort.at. [Online] [Zitat vom: 7. Feb. 2015.] http://www.insort.at/media/images/3_wege_sortierer/sherlock_separator_Informationenblatt_de%201.0.pdf.
72. **Lukka, Thomas, et al.** ZenRobotics Recycler - Robotic Sorting using Maschine Learning. [Hrsg.] Thomas Prez und Hermann Wotruba. *Sensor - Based Sorting 2014.* Aachen : GDBM, 2014, Bd. 135, S. 169-176. ISBN 978-3-940276-56-8.
73. **Neuhold, Robert und Huber, Reinhold.** *Sortierleiste.* EP 1754550 Europa, 20. Mai 2009.

74. **MAC**. <http://www.macvalves.com>. [Online] [Zitat vom: 18. Mai 2015.] <http://www.macvalves.com/Products/large-3-way-valves/52-series>.
75. *Sortiereinrichtung*. AT 395 545 Austria, 04. 10 1990. Patentschrift.
76. **Gulas, Stefan**. *Diplomarbeit: Untersuchungen zur Frage der Trennergebnisbeurteilung bei optischen Sortierapparaten*. Leoben : Montanuniversität Leoben, 1996.
77. **Gschwandtner, Günther**. Optoelektronische Sortierung von Industriemineralien. *Sensorgestützte Sortierung 2010*. Aachen : GDMB, 2010, Bd. 122.
78. **Huber, Reinhold**. Sorting based on UV-Absorption and Fluorescence. [Buchverf.] Thomas Pretz und Hermann Wotruba. *Sensor Based Sorting 20012*. Aachen : GDMB, 2012, Bd. 128, S. 49.
79. **Flachberger, Helmut und Böhm, Andreas**. Vortrag: Aufbereitungstechnische Untersuchungen als wesentliche Grundlage für die Verfahrensgestaltung in Aufbereitungsanlagen. *Aufbereitungstechnisches Seminar 2014*. Leoben, Austria : s.n., 30. Januar 2014.
80. **Freyd, Diego, Makari, Christian und Neuhold, Robert**. *Etikettenentferner*. EP1890798 Austria, 29. Januar 2009. Verfahren.
81. **Pramer, Jürgen und Reinhold, Huber**. Neue Methoden zur Effizienzsteigerung von optischen Sortiergeräten am Beispiel der Glassortierung. [Buchverf.] Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann. *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, Bd. 7.
82. **Spauzus, Signmar und Schnapp, Ulrich**. *Glas - allgemein verständlich*. Leipzig : s.n., 1977.
83. EUR-Lex. *Richtlinie 94/62/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Dezember 1994 über Verpackung und Verpackungsabfälle*. (ABl. L 365 vom 31.12.1994, S. 10). [Online] [Zitat vom: 15. September 2015.] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ>.
84. **BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft)**. Verpackungsverordnung 2014, BGBl. II Nr. 184/2014. *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen und bestimmten Warenresten*. [Online] [Zitat vom: 15. September 2015.]
85. EUR-Lex. *Entscheidung der Kommission 2001/171/EG, ABl. L 62 vom 2. zur Festlegung der Bedingungen, unter denen die Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle festgelegten Schwermetallgrenzwerte nicht für Glasverpackungen gelten vom 19. Februar 2001*. [Online] [Zitat vom: 9. Januar 2016.]
86. **Cirar, Kristin, et al**. Erschließen neuer Geschäftsfelder durch strategische Forschungsk Kooperationen bei Binder+Co. *BHM - Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2011, Bd. 156, 10/2011.

87. **Huber, Reinhold.** *Vorrichtung zum Erfassen und Erkennen von Objekten.* EP2083261 2009.
88. **Okrusch, Martin und Mathes, Siegfried.** *Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenlehre.* Würzburg : Springer-Verlag, 2005.
89. **Svoboda, Jan.** *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials.* Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2004.
90. **Analyticon Instruments.** Handbuch zum röntgenfluoreszenz-Analysator NITON XL3t. 2010.
91. DIN 51081 - Bestimmung der Massenänderung beim Glühen. 2002.
92. **Salinen Austria AG.** Bestimmung des löslichen Anteils von Steinsalz. [Hr. Katzlinger per e-mail an Hrn Eixelberger]. 2013. per e-mail von Hrn Robert Katzlinger.
93. **Perkin Elmer Ltd.** LS 55 User's Guide. Beaconsfield, UK : s.n., 2000. Part Number 09934436.
94. **Perkin Elmer Ltd.** Hardware Guide - High Performance Lambda. Beaconsfield, UK : s.n., 2011. Part Number L6050008.
95. **Ocean Optics.** Installation and Operation Manuel. *USB2000 + Fiber Optics Spectrometer.* Dunedin, USA : s.n., 2010. Document Number 270-00000-000-02-201107.
96. **Hofer, Johannes.** *Master Thesis: Fluorescence- and reflection spectroscopy of industrially relevant minerals for automatic sensor based sorting applications.* Graz : TU Graz, 2012. gesperrt.
97. **Marfunin, A. S.** *Physics of Minerals and Inorganic Materials.* Berlin Heidelberg : Springer, 1979. ISBN 3-540-08982-9.
98. **Marfunin, A. S .** *Spectroscopy, Luminescence and Radiation Centers in Minerals.* Berlin Heidelberg New York : Springer, 1979. ISBN 3-540-09070-3.
99. **Altana, Stephen, P., et al.** Ammonium in alunites. *American Mineralogist.* 1988, Bd. Volume 73, S. pages 145-152. http://www.minsocam.org/ammin/AM73/AM73_145.pdf; 16.April.2016.
100. **Clark, Roger, N.** Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy. *Manual of Remote Sensing.* Rencz, A., N. New York : John Wiley and Sons, 1999, S. 3-58. (Invited book chapter) Online at: <http://speclab.cr.usgs.gov> .
101. **Schott AG.** TIE-36: Fluorescence of optical glass. [Online] September 2004. [Zitat vom: 2. März 2016.] http://www.schott.com/advanced_optics/german/download/schott_tie-36_fluorescence_of_optical_glass_eng.pdf.

102. www.orau.org. [Online] 1999. [Zitat vom: 2. März 2016.]
<https://www.orau.org/ptp/collection/consumer%20products/vaseline.htm>.
103. **Henkel, Gerhard, Modreski, Peter J. und Verbeek, Earl R.** The Henkel Glossary of Fluorescent Minerals. *The Journal of the Fluorescent Mineral Society*. 1989, Volum 15.
104. **Blasse, G. und Gramaier, B.C.** *Luminescenc Materials*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1994. ISBN 3-540-58019-0.
105. **Broicher, H. F.** *Nutzung der Analyse der laser-induzierten Fluoreszenz zur Online-Einzelkornsortierung*. 2012. Entwicklungsbericht der Fa. Rock ID Consulting im Auftrag der Fa. Binder+Co AG.
106. Database of luminescent Minerals-Scheelite. [Online] [Zitat vom: 19. März 2016.]
<http://www.fluomin.org/galeriespectre/spectre.php?lg=fr&name=SCHEELITE>.
107. Database of Luminescent minerals. [Online] [Zitat vom: 18. März 2016.]
<http://www.fluomin.org/uk/fiche.php?id=29&name=FLUORITE>.
108. Database of luminescent Minerals. [Online] [Zitat vom: 18. März 2016.]
<http://www.fluomin.org/galeriespectre/spectre.php?lg=fr&name=CALCITE>.
109. Database of luminescent Minerals. [Online] [Zitat vom: 19. März 2016.]
<http://www.fluomin.org/uk/fiche.php?id=475&name=MAGNESITE>.
110. **Shionoya, Shigeo.** Principal phosphor materials and der optical properties - Ia-VIIb compounds. [Buchverf.] Shigeo Shionoya und William M. Yen. [Hrsg.] Phosphor Research Society. *Phosphor Handbook*. Shionoya, Shigeo; Yen, William M. . Boca Raton, Bosten, London, New York, Washington D.C. : CRC Press, 1999, 3.5, S. 213-217.
111. **Pansinger, Christian und Huber, Reinhold.** *Verfahren und Vorrichtung zur Detektion und Sortierung von Glas*. EP 1752228 B1 EU, 24. November 2010. Verfahren und Vorrichtung.
112. **Huber, Reinhold und Leitner, Karl.** *Verfahren und Vorrichtung zum Detektieren von bleihältigen Glasstücken*. EP 2467702 B1 EU, 17. September 2014. Verfahren und Vorrichtung.
113. **Huber, Reinhold und Reinhard, Taucher.** *frontangeregtes Fluoreszenz-System*. GM 50038/2015 Österreich, 09. März 2015. Gebrauchsmuster.
114. **Rongen, Mathi, et al.** *Sorting of recycled glass by Hyper Spectral Imaging*. CelSian Glass & Solar b.v., Glass Trend Seminar-Alternative Raw materials and Advanced Batch Pretreatments for glass melting. Eindhoven, Netherlands : s.n., 2012. Präsentation.
115. **Diderich, Dirk.** Aktuelle Qualitätsanforderungen Altglas - Vortrag. Gleisdorf, Austria : GmbH, IGR Institut für Glas- und Rohstofftechnologie, 23. Februar 2016. mündliche Mitteilung .

116. **Sachtleben Bergbau GmbH & Co. KG.** Sachtleben-Bergbau. [Online] [Zitat vom: 16. Mai 2016.] <http://www.sachtleben-bergbau.de/aufbereitung/>.

117. **Luckeneder, Christoph.** *Anlagenbegehung* . Wolfach, 17. April 2013.

118. **Stadtschnitzer, DI. Alfred.** *Dissertation, Optimierung des Schwerspat-/Flußspatausbringens in der Aufbereitungsanlage Wolfach der Sachtleben Bergbau GmbH.* Leoben : Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl f. Aufbereitung und Verdlung, 2010.

119. **White, William R.** *Separation or concentration of magnesium-bearing minerals by induced fluorescence.* *US Patent 4, 423814 USA*, 1984.

120. **Langhals, Heinz und Zgela, Dominik, Schlücke, Thorben.** Scientific Research Publishing. [Online] 2014. [Zitat vom: 21. Mai 2016.] *Green and Sustainable Chemistry*, 2014, 4, 144-150. <http://www.scirp.org/journal/gsc/>. ISSN 2160-6951.

121. **Riedel, E.** *Anorganische Chemie* . Berlin – New York : de Gruyter, 2004.

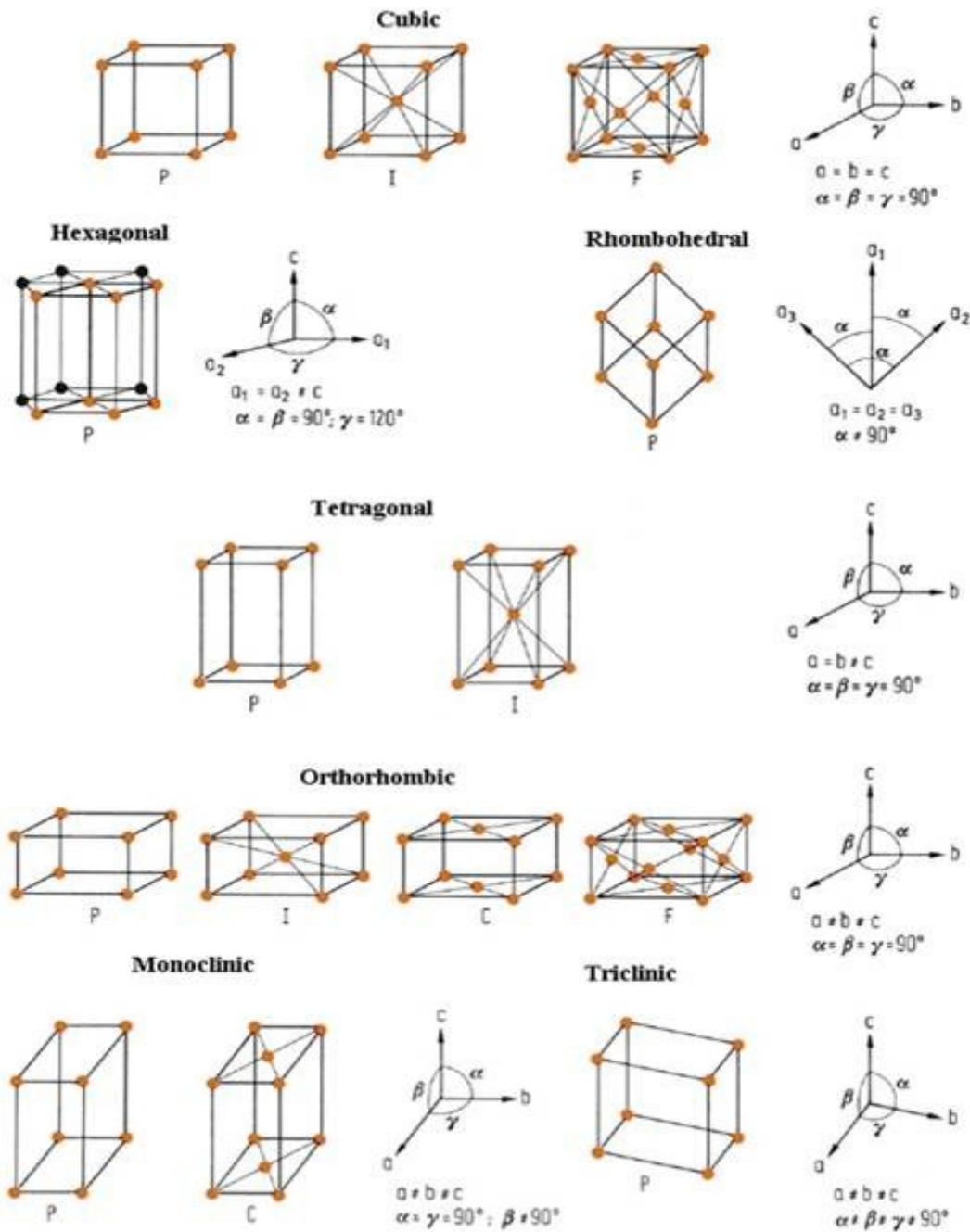
Verwendete Abkürzungen

| | |
|----------------|--|
| Binder + Co AG | Maschinenbauunternehmen, Gleisdorf, Austria |
| CCD | Charge-Couple-Device |
| CHEF | C helated E nhanced F luorescence |
| CIE | Commission International d'Éclairage - standardisierter XYZ-Farbraum |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor |
| CRITERION | Kunststoffflaschen-Sortierer der Fa. Binder+Co AG (Produktname) |
| EAG | Elektroaltgeräte |
| FIR | fernere Infrarot (Teil des IR-Spektrums) |
| GFS | Glasflaschen-Sortierer der Fa. Binder+Co AG (Produktname) |
| GK | Glaskeramik |
| GUI | Grafische Benutzeroberfläche (G raphical U ser I nterface) |
| HSV | Farbton (Hue), Sättigung (Saturation) und Helligkeit (Value) - Koordinatensystem zur Darstellung von Farben |
| IF | induced fluorescence bzw. induzierte Fluoreszenz |
| IR | infraroter Teil des Strahlungsspektrums |
| k.A. | keine Auswertung möglich |
| k.P. | keine Probe vorhanden |
| KF | Kristallfeld-Effekt |
| KSP | Keramik, Stein und Porzellan (nichttransparente Störstoffe im Altglas) |
| LASER | Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation |
| LED | Light emitting Diode |
| LIBS | Laser induced breakdown spectroscopy |
| LIF | Laser induced fluorescence |
| LLA | LLA Instruments GmbH |
| LOI | Lost on ignition |
| LUT | Lookup Table – Referenztafel zur Farbklassifizierung von RGB-Pixel |
| MIR | mittleres Infrarot (Teil des IR-Spektrums) |
| MUL | Montanuniversität Leoben |
| NIR | nahes Infrarot (Teil des IR-Spektrums) |
| ppm | parts per million (Teile von Millionen) |
| RGB | R ot, G rün und B lau - Koordinatensystem zur Darstellung von Farben |
| ROI | Region of Interest |
| ROM | Run of Mine |
| SPS | Speicher programmierbare Steuerung |
| StdDev | Standard Deviation |

| | |
|------|---|
| TDI | Time Delay Integration |
| TRIZ | Theorie des erfinderischen Problemlösens nach Genrich S. Altshuller |
| TUG | Technische Universität Graz |
| TW | Trockenwäsche (Konditionierungsschritt in der Altglasaufbereitung) |
| URL | Uniform Resource Locator (Internetadresse) |
| UV | ultravioletter Teil des Strahlungsspektrums |
| VIS | sichtbarer Teil des Strahlungsspektrums |

Anhang

A. Bravais Gitter



Kristallographische Achsensysteme und Bravais Gitter; Quelle: (121)

B. Gruppierung der Minerale (Vereinfacht nach Strunz 1982)

| | Klasse | Abteilung | Beispiele |
|-----------------------------------|---|--|--|
| 1. | Elemente | Gediegene Metalle | Kupfer Cu, Silber Ag, Gold Au, Platinmetalle, Quecksilber Hg |
| Metalloide (Halbmetalle) | | Arsen As, Antimon Sb, Wismut (Bismut) Bi | |
| Nichtmetalle | | Graphit und Diamant C, Schwefel S, Selen Se, Tellur Te | |
| 2. | Sulfide Selenide Telluride Arsenide Antimonide Bismutide | | Galenit (Bleiglanz) PbS, Sphalerit (Zinkblende) ZnS, Argentit (Hoch-Silberglanz) Ag ₂ S |
| | | | Naumannit α -Ag ₂ Se |
| | | | Hessit α -Ag ₂ Te |
| | | | Löllingit FeAs ₂ , Sperryolith PtAs ₂ |
| | | | Aurostibit AuSb ₂ |
| | | | Froodit PbBi ₂ |
| 3. | Halogenide | | Halit (Steinsalz) NaCl, Fluorit (Flussspat) CaF ₂ |
| 4. | Oxide Hydroxide | | Korund Al ₂ O ₃ , Quarz SiO ₂ , Hämatit (Eisenglanz) Fe ₂ O ₃ Gibbsit γ -Al(OH) ₃ , Goethit α -FeOOH |
| 5. | Karbonate Nitrate Borate | | Calcit (Kalkspat) Ca[CO ₃] Nitratin (Natronsalpeter) Na[NO ₃] Sinhalit MgAl[BO ₄] |
| 6. | Sulfate Chromate Molybdate Wolframate | | Baryt (Schwerspat) Ba[SO ₄], Gips Ca[SO ₄] · 2H ₂ O Krokoit Pb[CrO ₄] Wulfenit Pb[MoO ₄] Scheelit Ca[WO ₄] |
| 7. | Phosphate Arsenate Vanadate | | Apatit Ca ₅ [(F,Cl,OH)/(PO ₄) ₃] Mimetit Pb ₅ [Cl/(AsO ₄) ₃] Vanadinit Pb ₅ [Cl/(VO ₄) ₃] |
| 8. | Silikate | Insel­silikate | Olivin (Mg,Fe) ₂ [SiO ₄] |
| | | Gruppen­silikate | Thortveitit Sc ₂ [Si ₂ O ₇] |
| | Ringsilikate | Dreier­ringe | Benitoid BaTi[Si ₃ O ₉] |
| | | Vierer­ringe | Axinit Ca ₂ (Mg,Fe)B[O/OH/(Si ₂ O ₇) ₂] |
| | | Sechser­ringe | Beryll Al ₂ Be ₃ [Si ₆ O ₁₈] |
| | Kettensilikate | Einfachketten | insbesondere Pyroxene wie Diopsid CaMg[Si ₂ O ₆] |
| Doppelketten | | Amphibole wie Tremolit Ca ₂ Mg ₅ [(OH) ₂ /Si ₈ O ₂₂] | |
| Schichtsilikate Gerüstsilikate | | Glimmer wie Muscovit KAl ₂ [(OH,F) ₂ /AlSi ₃ O ₁₀] Feldspäte wie Kalifeldspat K[AlSi ₃ O ₈] | |
| 9. | Organische Minerale | | Whewellit CaC ₂ O ₄ · H ₂ O |

Gruppierung der Minerale (Vereinfacht nach Strunz 1982); Quelle: (36)

C. Evolution von Altglassortierern – Binder + Co A



E. Rohgutmusterübersicht (VerDaBa© und Musterarchiv)

| Nr. | Herkunft | Rohgut/Wertstoff | Gruppe | Nr. | Herkunft | Rohgut/Wertstoff | Gruppe |
|-----|-------------|----------------------|--------|-----|-------------------|----------------------|--------|
| 001 | Österreich | Kalkstein | P | 059 | Österreich | Magnesit | P |
| 002 | Deutschland | Fluorit-/Baryterz | P | 060 | Belgien | Bauschutt | S |
| 003 | Slowakei | Talk | P | 061 | Österreich | Granitschotter | S |
| 004 | China | Talk | P | 062 | Finnland | Phosphaterz | P |
| 005 | Brasilien | Bauxit | P | 063 | Österreich | Kalkstein | P |
| 006 | Indien | Bauxit | P | 064 | Deutschland | Steinsalz | P |
| 007 | Türkei | Bauxit | P | 065 | Türkei | Quarzschotter | P |
| 008 | Österreich | Magnesit | P | 066 | Südafrika | Granit | P |
| 009 | Österreich | Kalkmamor | P | 067 | Brasilien | Magnesit | P |
| 010 | Türkei | Magnesit | P | 068 | China | Magnesit | P |
| 011 | Türkei | Colemanit | P | 069 | keine Information | Ölschiefer | P |
| 012 | Türkei | Colemanit | P | 070 | Ungarn | Bauxit | P |
| 013 | Türkei | Colemanit | P | 071 | Albanien | Chromiterz | P |
| 014 | Türkei | Quarzschotter | P | 072 | Deutschland | Quarzkies | P |
| 015 | Türkei | Quarzschotter | P | 073 | Deutschland | Quarzschotter | P |
| 016 | Südafrika | Feldspat-Plutonit | P | 074 | Italien | Talk | P |
| 017 | Österreich | Kalkstein | P | 075 | Pakistan | Talk | P |
| 018 | Deutschland | Andesit | P | 076 | China | Talk | P |
| 019 | Deutschland | Quarzkies | P | 077 | Türkei | Quarzschotter | P |
| 020 | Österreich | Kalkmamor | P | 078 | Österreich/BRD | Altfeuerfestmaterial | S |
| 021 | Italien | Talk | P | 079 | Österreich | Kalkstein | P |
| 022 | Deutschland | Steinsalz | P | 080 | Mongolei | Obsidian | P |
| 023 | Deutschland | Verbrennungsschlacke | S | 081 | Deutschland | Zeolith | P |
| 024 | Türkei | Kohle | P | 082 | Slovakei | Granit | P |
| 025 | Österreich | Quarzkies | P | 083 | Frankreich | Talk | P |
| 026 | Österreich | Schlacke/Kies | S | 084 | Belgien | Steinsalz | P |
| 027 | Canada | Steinsalz | P | 085 | Uruguay | Elektroschrott | S |
| 028 | Österreich | Talk | P | 086 | Österreich | Kalkstein | P |
| 029 | Österreich | Scheelit | P | 087 | Agypten | Quarz | P |
| 030 | Türkei | Talk | P | 088 | Griechenland | Magnesit | P |
| 031 | Türkei | Quarzschotter | P | 089 | Österreich | Quarzkies | P |
| 032 | Türkei | Magnesit | P | 090 | Deutschland | Quarzkies | P |
| 033 | Slovakei | Granit | P | 091 | USA | Elektroschrott | S |
| 034 | Norwegen | Schmelzmagnesia | I | 092 | Brasilien | Phosphaterz | P |
| 035 | Spanien | Polysilizium | I | 093 | Schweiz | Schlacke/Blei | I |
| 036 | Spanien | Quarzschotter | P | 094 | Deutschland | Gleisschotter | P |
| 037 | Schweiz | Bauschutt | S | 095 | Österreich | Kupferschlacke | S |
| 038 | Polen | Steinsalz | P | 096 | Türkei | Fluoriterz | P |
| 039 | Belgien | Metallschrott | S | 097 | Deutschland | Quarzkies | P |
| 040 | Österreich | Kalkstein | P | 098 | Österreich | Zeolith | P |
| 041 | Australien | Talk | P | 099 | Brasilien | Talk | P |
| 042 | Russland | Pegmatit | P | 100 | Deutschland | Quarzkies | P |
| 043 | Russland | Syenit | P | 101 | Brasilien | Phosphaterz | P |
| 044 | Türkei | Magnesit | P | 102 | Österreich | Quarzkies | P |
| 045 | Türkei | Fluoriterz | P | 103 | Italien | Dolomit (gebrannt) | I |
| 046 | Türkei | Chalcedon | P | 104 | Türkei | Kalkstein | P |
| 047 | Belgien | Bauschutt | S | 105 | Österreich | Bauschutt | S |
| 048 | Österreich | Bauschutt | S | 106 | Frankreich | Kreide | P |
| 049 | Türkei | Magnesit | P | 107 | Dänemark | Metallschrott | S |
| 050 | Australien | Talk | P | 108 | Mauritius | Kohle-Schlacke | S |
| 051 | Deutschland | Polysilizium | I | 109 | Brasilien | Lithiumerz | P |
| 052 | Österreich | Steinsalz | P | 110 | Frankreich | Quarzkies | P |
| 053 | Slovakei | Baryterz | P | 111 | Österreich | Dolomit | P |
| 054 | Österreich | Kalkstein | P | 112 | Norwegen | Nickelmetall | I |
| 055 | Indien | Quarzschotter | P | 113 | Russland | Zeolith | P |
| 056 | Deutschland | Quarz | P | 114 | Österreich | Magnesit | P |
| 057 | Schweden | Kalkstein | P | 115 | Mozambique | Rubinerz | P |
| 058 | Österreich | Gips-/Anhydriterz | P | | | | |

| | | | | | |
|---|-------------------|---|----------------|---|------------------|
| I | Industrierohstoff | P | Primärrohstoff | S | Sekundärrohstoff |
|---|-------------------|---|----------------|---|------------------|

F. Probenübersicht – Sonderglas (8)

P001_Ca-Na.JPG



P002_Ca-Na.JPG



P003_Ca-Na.JPG



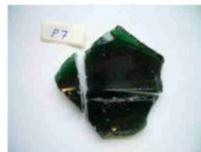
P004_Ca-Na.JPG



P005_Ca-Na.JPG



P006_Ca-Na.JPG



P007_Ca-Na.JPG



P008_Ca-Na.JPG



P009_Ca-Na.JPG



P010_Ca-Na.JPG



P011_Ca-Na.JPG



P012_Ca-Na.JPG



P013_Ca-Na.JPG



P014_Ca-Na.JPG



P015_Ca-Na.JPG



P016_Ca-Na.JPG



P017_Ca-Na.JPG



P018_Ca-Na.JPG



P019_Ca-Na.JPG



P020_Ca-Na.JPG



P021_Ca-Na.JPG



P022_Ca-Na.JPG



P023_Ca-Na.JPG



P024_Ca-Na.JPG



P025_Ca-Na.JPG



P026_Ca-Na.JPG



P027_Ca-Na.JPG



P028_Ca-Na.JPG



P029_Ca-Na.JPG



P030_Ca-Na.JPG



P031_Ca-Na.JPG



P032_Ca-Na.JPG



P033_Ca-Na.JPG



P034_Ca-Na.JPG



P035_Al-Si.JPG

Bilder der Proben P001 – P035



P036_AI-Si.JPG



P037_AI-Si.JPG



P038_AI-Si.JPG



P039_AI-Si.JPG



P040_AI-Si.JPG



P041_AI-Si.JPG



P042_AI-Si.JPG



P043_AI-Si.JPG



P044_AI-Si.JPG



P045_AI-Si.JPG



P046_AI-Si.JPG



P047_AI-Si.JPG



P048_AI-Si.JPG



P049_B-Si.JPG



P050_B-Si.JPG



P051_B-Si.JPG



P052_B-Si.JPG



P053_B-Si.JPG



P054_B-Si.JPG



P055_B-Si.JPG



P056_Ca-Na.JPG



P057_B-Si.JPG



P058_Ca-Na.JPG



P059_B-Si.JPG



P060_B-Si.JPG



P061_B-Si.JPG



P062_AI-Si.JPG



P063_Ca-Na.JPG



P064_AI-Si.JPG



P065_B-Si.JPG



P066_B-Si.JPG



P067_B-Si.JPG



P068_Ca-Na.JPG



P069_B-Si.JPG



P070_AI-Si.JPG

Bilder der Proben P036 – P070



P071_Al-Si.JPG



P072_Ca-Na.JPG



P073_Ca-Na.JPG



P074_Ca-Na.JPG



P075_Ca-Na.JPG



P076_Ca-Na.JPG



P077_Ca-Na.JPG



P078_Ca-Na.JPG



P079_Ca-Na.JPG



P080_Al-Si.JPG



P081_Ca-Na.JPG



P082_B-Si.JPG



P083_B-Si.JPG



P084_B-Si-(ähnlich).JPG



P085_Ca-Na-(ähnlich).JPG



P086_Ca-Na-(ähnlich).JPG



P087_Ca-Na-(ähnlich).JPG



P088_Ca-Na-(ähnlich).JPG



P089_Ca-Na-(ähnlich).JPG



P090_Ca-Na-(ähnlich).JPG



P091_Ca-Na-(ähnlich).JPG



P092_Ca-Na.JPG



P093_Al-Si.JPG



P094_Al-Si.JPG



P095_Ca-Na.JPG



P096_Ca-Na.JPG



P097_Al-Si.JPG



P098_Ca-Na.JPG



P099_Ca-Na.JPG



P100_Ca-Na.JPG



P101_Ca-Na.JPG



P102_Ca-Na.JPG



P103_Al-Si.JPG



P104_Al-Si.JPG



P105_Al-Si.JPG

Bilder der Proben P071 – P105



P106_Al-Si.JPG



P107_Al-Si.JPG



P108_Ca-Na.JPG



P109_B-Si.JPG



P110_Quarz.JPG



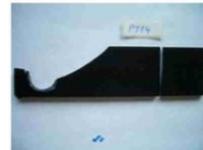
P111_Al-Si.JPG



P112_Al-Si.JPG



P113_Al-Si.JPG



P114_Al-Si.JPG



P115_Al-Si.JPG



P116_Al-Si.JPG



P117_Ca-Na.JPG



P118_Al-Si.JPG



P119_Al-Si.JPG



P120_B-Si_(GATT01).JPG



P121_B-Si_(GATT03).JPG



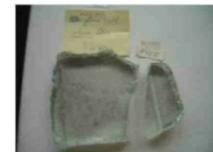
P122_B-Si_(GATT04).JPG



P123_Bleiglas.JPG



P124_Ca-Na_(+Ba).JPG



P125_Ca-Na_(+Ba).JPG



P126_Ca-Na_(+Ba).JPG



P127_Ca-Na_(+Ba).JPG



P128_Bleiglas.JPG



P129_Bleiglas.JPG

P130_Al-Si_(ähnlich)_
(MIKRO-2).JPGP131_Al-Si_(ähnlich)_
(MIKRO-1).JPG

P132_Al-Si_(ähnlich).JPG



P133_nicht-glasartig.JPG



P134_Al-Si_(ähnlich).JPG

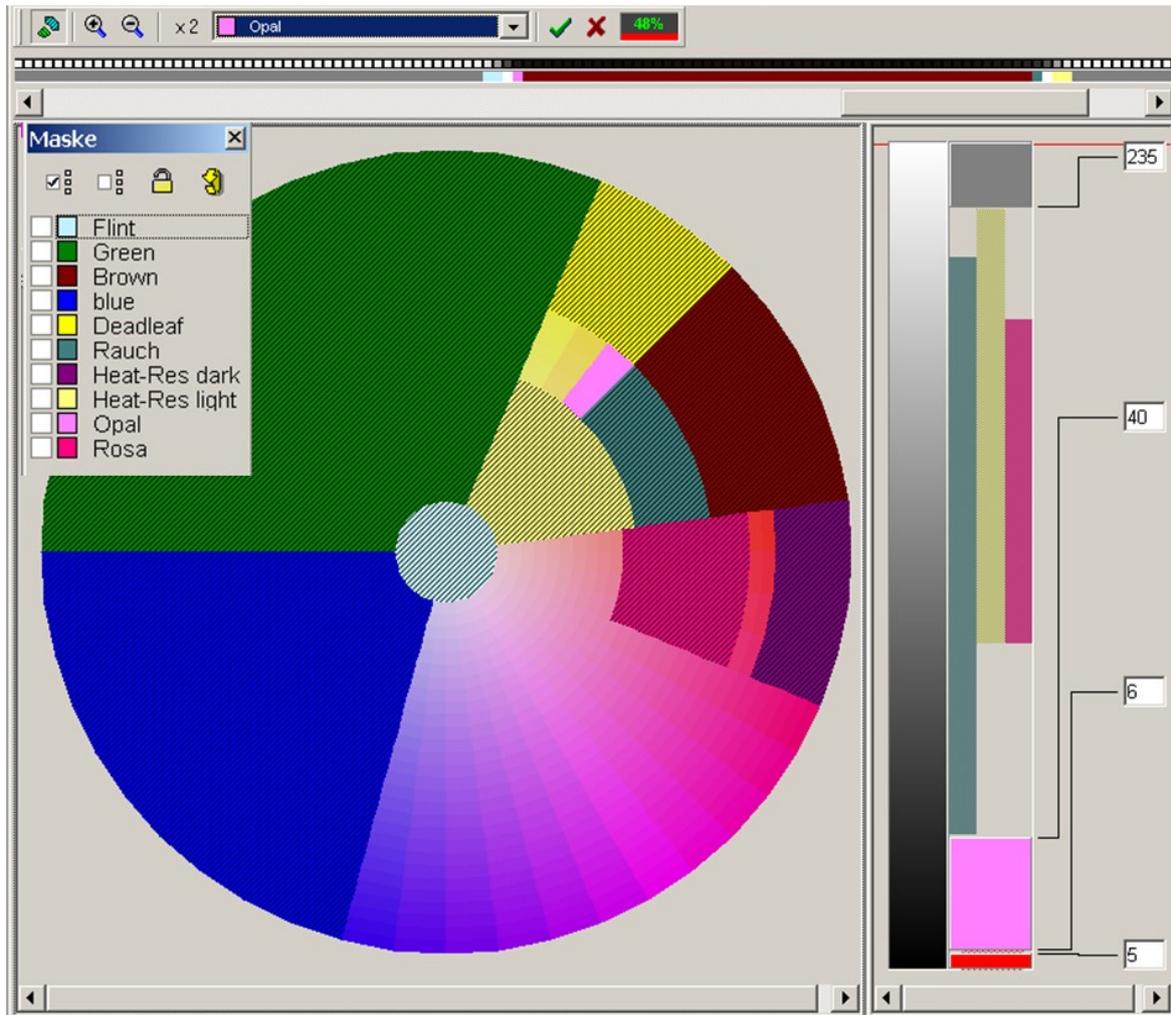
P135_Al-Si_(ähnlich)_
(Glasur_abgeschliffen).JPGP136_Al-Si_(ähnlich)_
(Glasur_abgeschliffen).JPGP137_Bleiglas_(ähnlich)_
(Glasur_abgeschliffen).JPGP138_AlSi+CaNa_(ähnlich)_
(Glasur_abgeschliffen).JPG

P139_Bleiglas.JPG

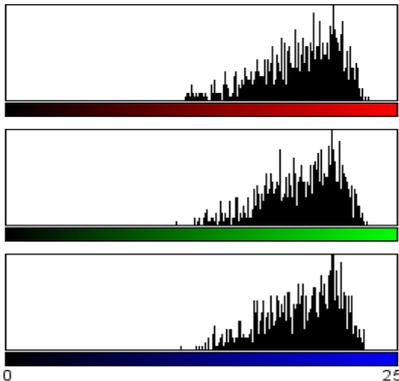
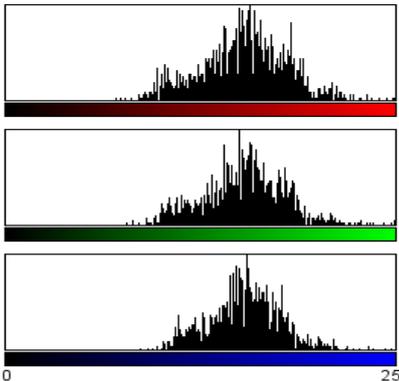
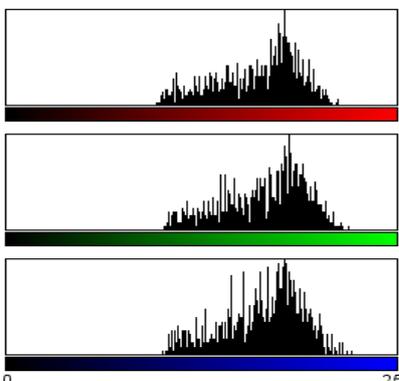
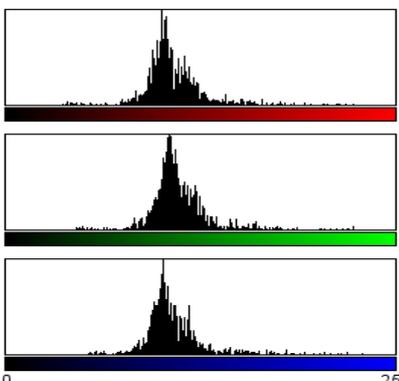
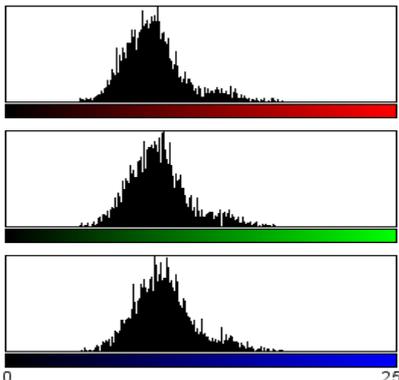
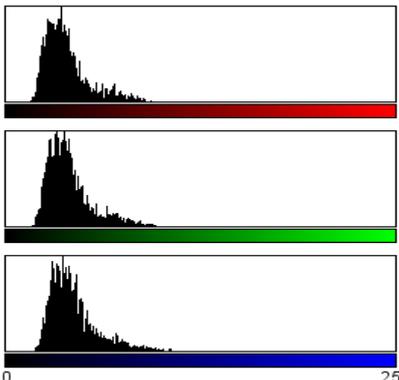
P140_Silikat
(+Na2O+Al2O3).JPG

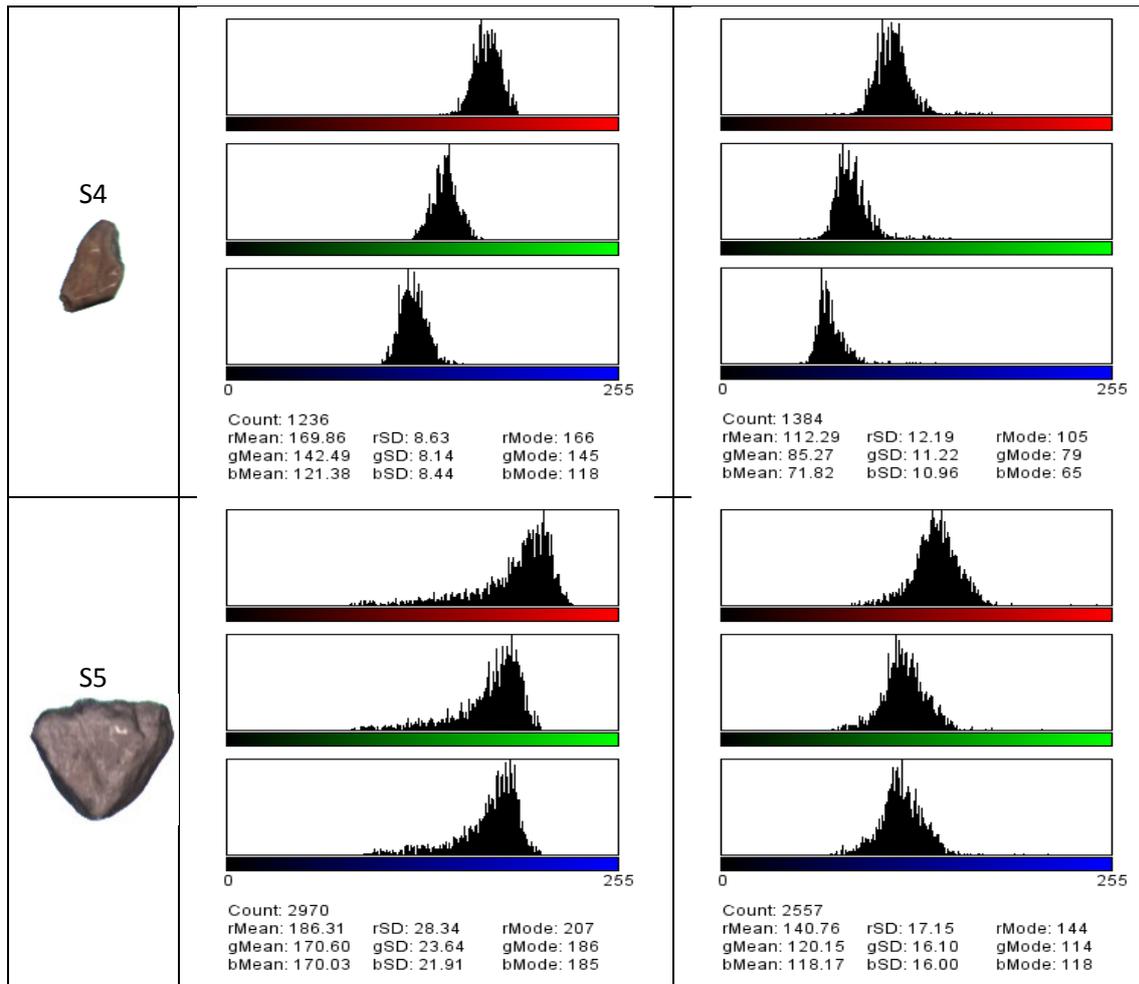
Bilder der Proben P106 – P140

G. Klassifikator (LUT) zum Vergleich von Kalk-Natron-Glas mit Glaskeramik



H. RGB-Histogramme zu Quarzkies-89/2013

| Probe | trocken | nass |
|---|---|---|
| <p>S1</p>  |  <p>Count: 884 rMean: 191.07 rSD: 26.41 rMode: 214 gMean: 192.54 gSD: 24.58 gMode: 213 bMean: 192.63 bSD: 24.61 bMode: 214</p> |  <p>Count: 1470 rMean: 156.23 rSD: 28.80 rMode: 160 gMean: 155.99 gSD: 27.18 gMode: 153 bMean: 156.99 bSD: 24.03 bMode: 158</p> |
| <p>S2</p>  |  <p>Count: 957 rMean: 164.09 rSD: 27.57 rMode: 182 gMean: 168.59 gSD: 27.15 gMode: 185 bMean: 167.26 bSD: 26.32 bMode: 182</p> |  <p>Count: 1380 rMean: 110.10 rSD: 21.25 rMode: 102 gMean: 113.91 gSD: 20.96 gMode: 107 bMean: 110.23 bSD: 20.65 bMode: 103</p> |
| <p>S3</p>  |  <p>Count: 3657 rMean: 97.40 rSD: 21.49 rMode: 99 gMean: 100.48 gSD: 21.05 gMode: 103 bMean: 103.69 bSD: 21.05 bMode: 97</p> |  <p>Count: 3796 rMean: 39.63 rSD: 14.94 rMode: 36 gMean: 41.54 gSD: 15.11 gMode: 33 bMean: 44.35 bSD: 16.20 bMode: 37</p> |



J. Beispiel zu Rohgutstamtblatt erstellt aus VerDaBa©

binder+co

Projektdaten allgemein

| | | | |
|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Nummer | 010 | Obergruppe | Industriemineral |
| Rohgut | Magnetit | Ansprechpartner Int. | [REDACTED] |
| Erstellungsdatum | 01.08.2013 14:55:01 | letzte Änderung | 10.12.2015 17:40:07 |
| Kunde | [REDACTED] | | |
| Kontaktadresse | [REDACTED] | | |
| | [REDACTED] | | |
| | [REDACTED] | | |
| | [REDACTED] | | |

Material

Herkunft , Türkei Bestand Magnetit, Calcit, Dolomit, Chalzedon, Serpentin Lager

Rohgut

| Merkmalsklasse | MK1 - MK3 | MK4 | MK5a | MK5b | MK6 | MK7 |
|---|--|-----------------------------|--|--|--|---|
| Bezeichnung | Magnetit | Verwachsung | Calcit | Dolomit | Chalzedon | Serpentin |
| Klassenmerkmal | MP; MK1: weiß; MK2: gelb; MK3: rosa | Magnetit + Serpentin,... | MP | MP | MP | MP |
| Verweis Schuhmann | 148 | 0 | 70 | 72 | 38 | 88 |
| Gutmaterial | ✓ | | | | | |
| Formel | Mg[CO ₃] | n.e. | Ca(CO ₃) | CaMg(CO ₃) ₂ | SiO ₂ | Mg ₆ ((OH) ₈ (Si ₄ O ₁₀) |
| Dichte (g/cm ³) | 2,9-3,1 | n.e. | 2,6 - 2,8 | 2,9 | 2,58 - 2,64 | 2 - 2,6 |
| Mohs-Härte | 4-4,5 | n.e. | 3 | 3,5-4 | 6,5 - 7 | 2,5 - 4 |
| Magnetische Suszeptibilität (m ³ /kg)*10 ⁻⁹ | diamagnetisch (-6 ... +60) | n.e. | diamagnetisch (-45) | diamagnetisch (5 ... 80) | diamagnetisch (-6) | paramagnetisch |
| Elektrische Leitfähigkeit (S/m) | Halbleiter; (10 ⁻⁷ ...10 ⁻⁹) | n.e. | Halbleiter; (10 ⁻⁸ ... 10 ⁻¹²) | Halbleiter; (10 ⁻⁴ ...10 ⁻⁷) | Nichtleiter; (10 ⁻¹¹ ... 10 ⁻¹⁴) | Halbleiter |
| Oberflächen- benetzbarkeit | hydrophil | n.e. | hydrophil | hydrophil | hydrophil | hydrophil |
| Wasseraufnahme- fähigkeit | ~5,5% | n.e. | n.e. | n.e. | ~1,5% | ~10% |
| Raman Vermessung | | | | | | |
| opt. Eigenschaft IR | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| opt. Eigenschaft VIS | weiß, gelb, rosa | alle Farben | weiß, rosa | weiß | weiß, rosa | dunkle Farben |
| opt. Eigenschaft UV | ✓ | | ✓ | | ✓ | |
| XRF | | | | | | |

Aufgabematerial

| | | | | | | |
|---|---------------|--|--|--|--|--|
| Korngröße (mm) | 20 - 50 | | | | | |
| Flächengewicht (kg/m ²) | 31,0 | | | | | |
| Schüttdichte (kg/l) | 1,50 | | | | | |
| Tonnage (t/h/m) bei 1,5 m/s und 25% Belegung | 41,90 | | | | | |
| Fraktionsaufteilung (%) (MK1/MK2/MK3/...) | MK1 - MK3: 63 | | | | | |
| Beschreibung | feucht | | | | | |

Produktqualitäten

| Bezeichnung | Konzentrat 1 | Konzentrat 2 | Konzentrat 3 | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--|--|--|
| beinhaltende MK | MK 1 | MK 2 | MK 3 | | | |
| geforderter chem. Gehalt | | | | | | |
| Farbtöne | | | | | | |
| Sonstiges | | | | | | |

binder+co

Verfahren

| | VIS | NIR 1700 | NIR 2300 | UV | XRT | LIF | Versuch | Maschine | Zusatz |
|----------------|-----|----------|----------|----|-----|-----|---------------------|----------|--------|
| Analyse | | ✓ | ✓ | | | | 11 - 16, 12 - 10 | | |
| Sortierversuch | ✓ | ✓ | ✓ | | | | 11 - 05 | M, M-NIR | |

Anmerkungen

Rohmaterial

MK1 kryptokristallin; MK1 beste Qualität

Bilder



MK1



MK2



MK3



MK4

binder+co



MK5a



MK5b



MK6

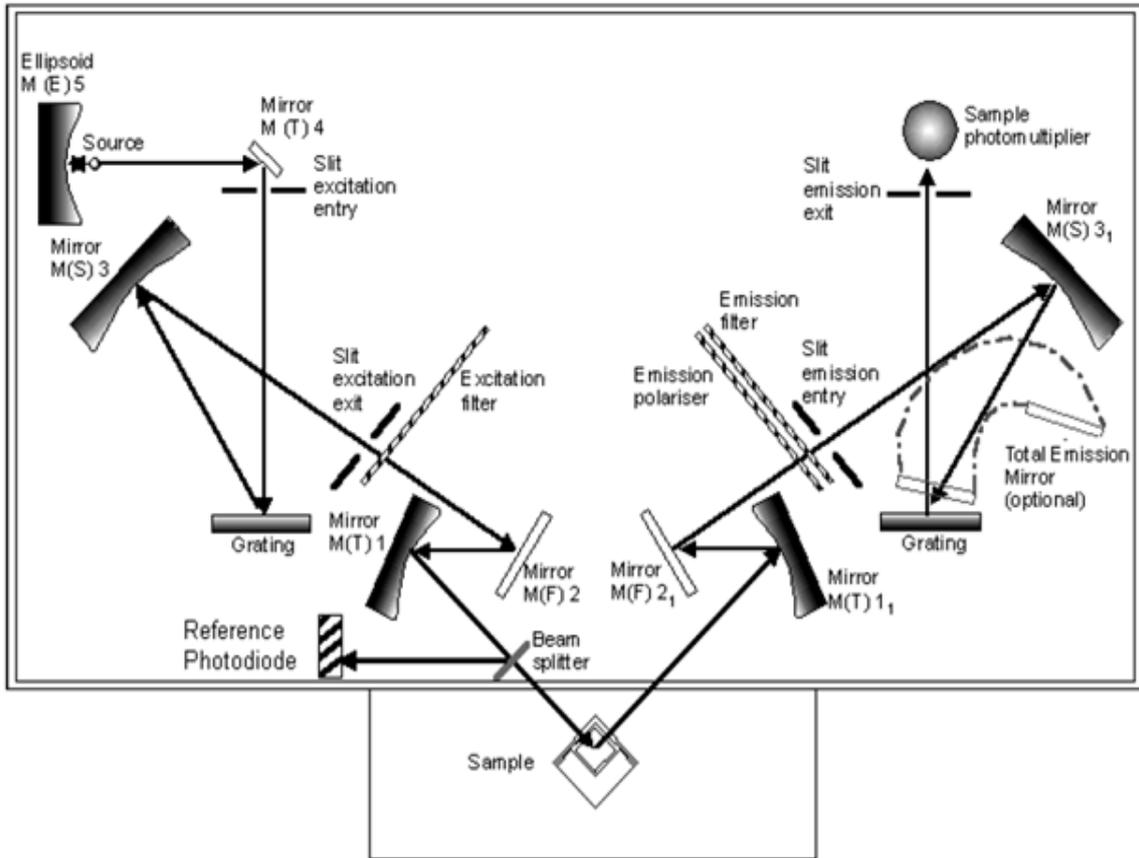


MK7

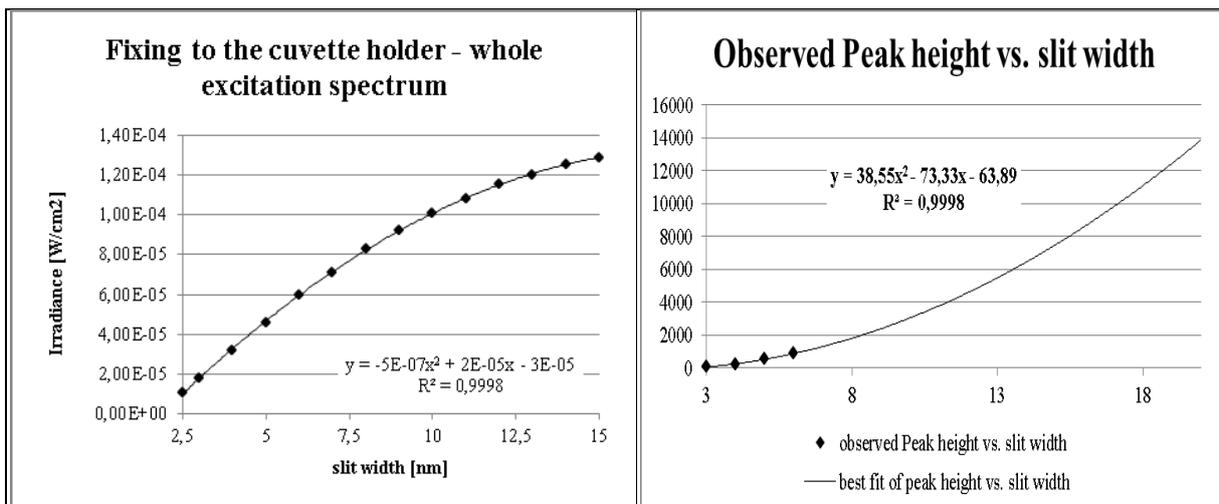
| | |
|-----------------|--|
| Native | Diamond |
| Oxides | Brucite $Mg(OH)_2$, Corundum Al_2O_3 , Ruby Al_2O_3 , Sapphire Al_2O_3 |
| Halogenides | Fluorite CaF_2 , Halite $NaCl$, Calomel $HgCl$ |
| Silica | Agate SiO_2 , Opal SiO_2 , Quartz SiO_2 |
| Phyllosilicates | Pyrophyllite $AlSi_2O_5OH$, Talc $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$, Serpentine $(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$ |
| Feldspar | Albite $NaAlSi_3O_8$, Microcline $KAlSi_3O_8$ |
| Pyroxenes | Diopside $CaMgSi_2O_6$, Spodumene $LiAlSi_2O_6$ |
| Amphiboles | Anthophyllite $(Mg, Fe)_7Si_8O_{22}(OH)_2$, Tremolite $Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$ |
| Zeolites | Natrolite $Na_2Al_2Si_3O_{10} \times 2H_2O$, Laumontite $CaAl_2Si_4O_{12} \times 4H_2O$, Analcite $NaAlSi_2O_6 \times H_2O$ |
| Feldspathoids | Sodalite $Na_4Al_3(SiO_4)_3Cl$ |
| Other silicates | Zircon $ZrSiO_4$, Datolite $CaBSiO_4(OH)$, Danburite $CaB_2Si_2O_8$, Eucryptite $LiAlSiO_4$, Willemite Zn_2SiO_4 , Wollastonite $CaSiO_3$, Sphene $CaTiSiO_5$, Scapolite $Na_4(Al, Si)_{12}O_{24}$, Axinite $Ca_2(Mn, Fe, Mg)Al_2(BO_3OH)(SiO_3)_4$, Benitoite $BaTiSi_3O_9$, Thorite $(Th,U)SiO_4$ |
| Carbonates | Aragonite $CaCO_3$, Calcite $CaCO_3$, Cerussite $PbCO_3$, Magnesite $MgCO_3$, Strontianite $SrCO_3$, Witherite $BaCO_3$ |
| Sulfides | Sphalerite $(Zn,Fe)S$, Wurtzite $(Zn,Fe)S$ |
| Sulfates | Barrite $BaSO_4$, Celestine $SrSO_4$, Gypsum $CaSO_4 \times 2H_2O$, Anhydrite $CaSO_4$, Alunite $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$, Zippeite $K_4(UO_2)_6(SO_4)_3OH_{10} \times 4 H_2O$, Ettringite $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \times 26 H_2O$, Hanksite $Na_{22}K(SO_4)_9(CO_3)_2Cl$ |
| Phosphates | Apatite $Ca_5(PO_4)_3(OH,F,Cl)$, Wavellite $Al_3(PO_4)_2(OH)_3 \times 5 H_2O$, Amblygonite $(Li,Na)AlPO_4(F,OH)$, Pyromorphite $Pb_5(PO_4)_3Cl$, Monazite $(Ce,La,Th,Nd,Y)PO_4$, Autunite $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \times 10 H_2O$, Xenotime YPO_4 |
| Tungstates | Scheelite $CaWO_4$ |
| Molybdates | Powellite $CaMoO_4$, Wulfenite $PbMoO_4$ |
| Borates | Colemanite $CaB_3O_4(OH)_3 \cdot H_2O$ |
| Organics | Amber $C_{10}H_{16}O$ |

Wesentliche unter UV-Bestrahlung lumineszierende Mineralien nach Gaft (14)

L. Aufbauschema LS 55



Schematischer Geräteaufbau LS 55 (93)

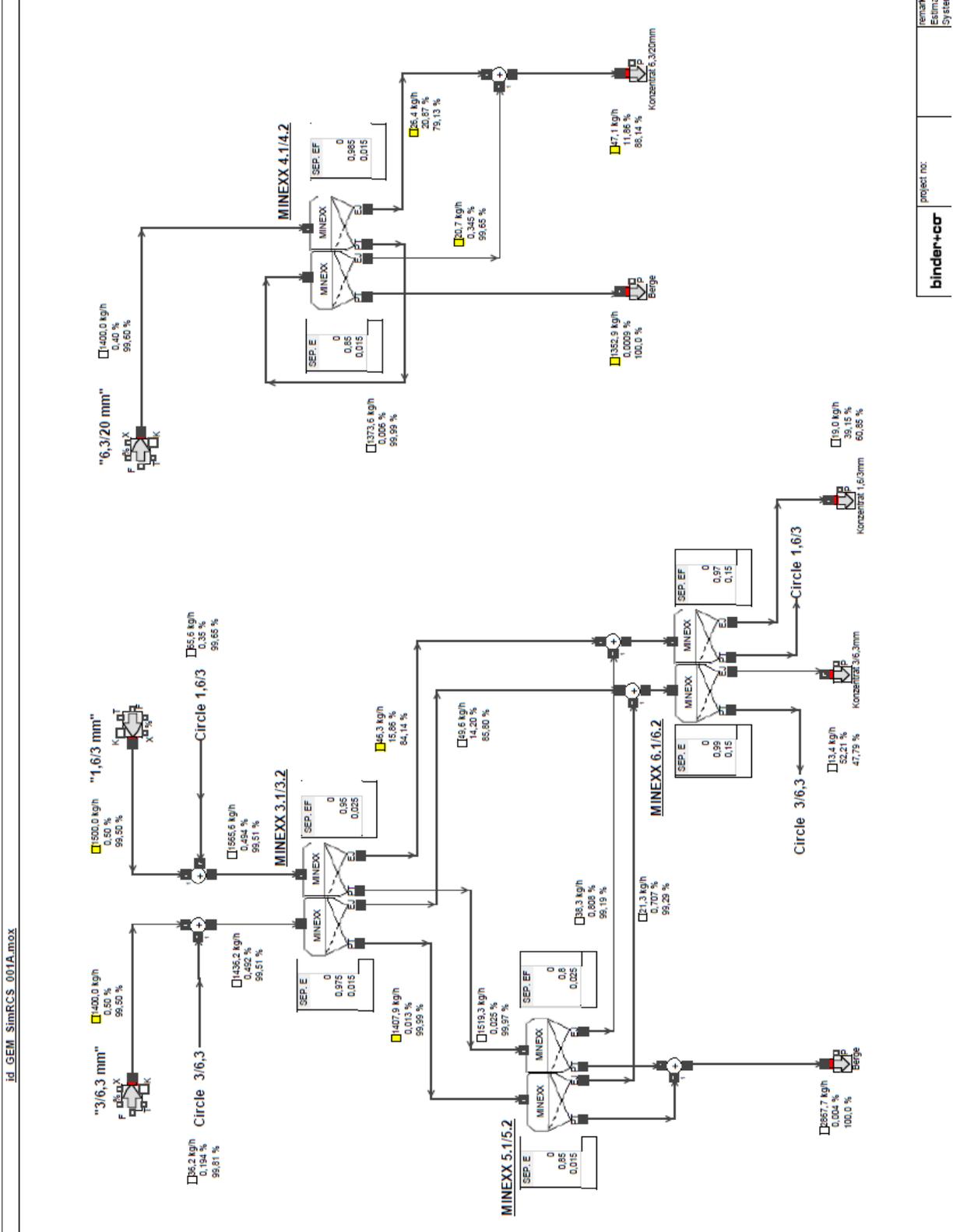


Bestrahlungsstärke vs. Anregungspaltweite (links) und relative Emissionsintensität vs. Emissionsspaltweite bei Anregungspalt 10 nm

| | Fluoreszenz | Phosp. 1 | Phosp. 2 | Phosp. 3 | Phosp. 4 | Phosp. 5 |
|--------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ex.WL [nm] | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 |
| Em. Slit [nm] | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Ex. Slit [nm] | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| U (PMT) [V] | 710 | 710 | 710 | 710 | 710 | 710 |
| Em. Filter [nm] | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 |
| Delay [ms] | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 |
| Gate [ms] | - | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Cycle time | - | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Flash Count | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Scanrate [nm/min] | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 |

Lebensdauerermittlung – Geräteeinstellungen für Scheelit-Probe M029

M. Rechnerische Simulation - Rubin- und Korundgewinnung - mit IDEAS®



id_GEM_SimRCS_001A.mox

project no. binder+cor

System