

# Helios Lab

Ein gemeinsames Labor zwischen Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie und der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

Richard Gloaguen, Sandra Lorenz

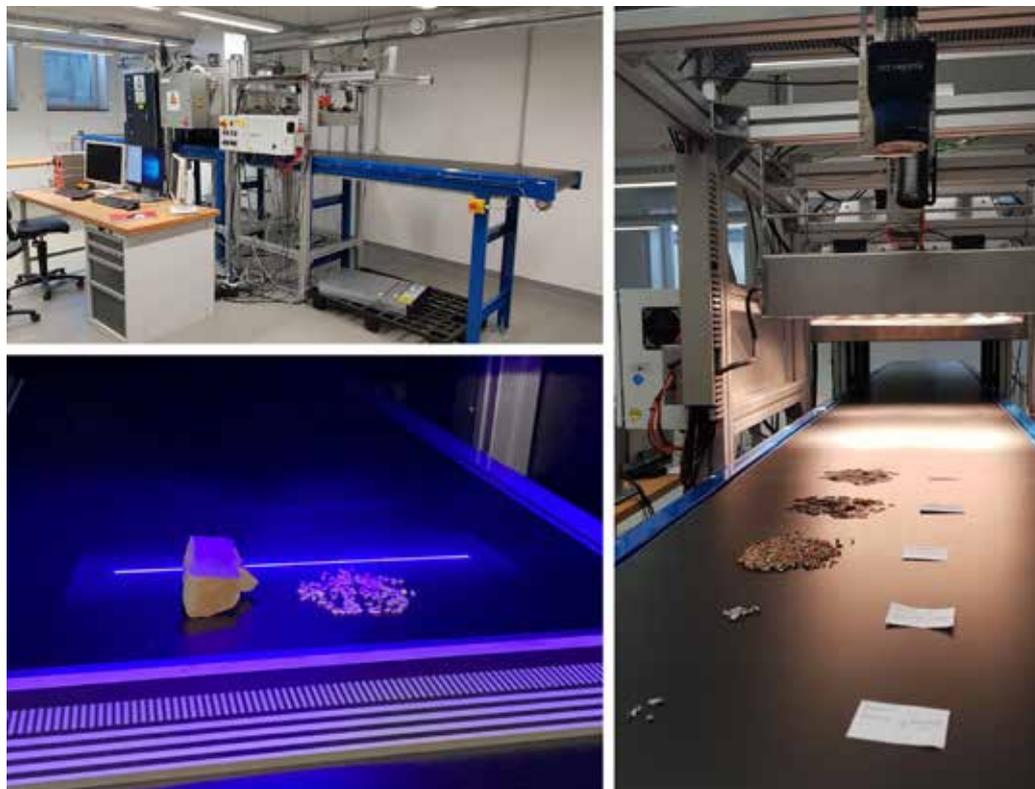


Abb. 1: Oben links: Das Helios Lab. Unten links: Laser-induzierte Fluoreszenz. Rechts: Testmessungen mit Produkten aus Lithiumbatterien.

Wenn wir die negativen Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf Klima und Umwelt reduzieren wollen, müssen wir uns zwangsläufig mit einer exponentiell steigenden Abfallmenge auseinandersetzen. Solche Abfälle beinhalten nicht nur die Reste unseres alltäglichen Konsums wie z.B. Elektroschrott. Im Bergbau wird beispielsweise nur ein kleiner Teil des geförderten Gesteins tatsächlich für die Gewinnung neuer Rohstoffe genutzt, der größere Rest landet auf Halden. Zusätzlich zu solchen primären Abfällen fallen große Mengen an Sekundärabfällen wie Verbrennungsrückstände und Schlacken an. Ein besseres Recycling unserer Reststoffe ist zu einer dringlichen Aufgabe geworden, und auch wenn eine vollständige Kreislaufwirtschaft in Zukunft Utopie bleiben muss, so sollten wir uns doch so viel wie möglich daran annähern.

Bisher wird nur ein kleiner Teil aller Abfälle recycelt. Ein wichtiger Grund ist die zunehmende Komplexität unserer Produkte und damit auch ihrer Überreste. Standard-Recyclingverfahren, die auf einfacher Sortierung basieren, können die enthaltenen Wertstoffe nicht mehr trennen. Um den Recyclingprozess zu verbessern, muss eine vollständige Charakterisierung der Abfallprodukte durchgeführt werden. Hier spielt das Helios Lab eine grundlegende Rolle (Abb. 1). Diese am Helmholtz-Institut Freiberg (HIF) beheimatete Forschungseinrichtung stellt eine gemeinsame Infrastruktur dar, die aus einer erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen dem HIF, dem Institut für Angewandte Physik der TU Bergakademie Freiberg

und Freiberg Instruments, einem erfolgreichen High-tech-Unternehmen mit Sitz in Freiberg, entstanden ist. Das Konzept des Helios Lab ist ziemlich einfach und besteht aus der Verwendung bildgebender Sensoren (um jedes Objekt auf einem Förderband zu kartieren) und der Nutzung maschinellen Lernens (um Echtzeitinformationen für eine bessere Sortierung und Verarbeitung bereitzustellen).

Einer der wichtigsten Eckpfeiler ist die hyperspektrale Bildgebung. Wie Prismen das Licht in alle sichtbaren Farben aufspaltet, messen diese Sensoren einfallendes Licht mit einer sehr hohen spektralen Auflösung. Weil jedes Material unterschiedlich mit dem Licht interagiert, kann man das reflektierte Signal

wie einen Fingerabdruck nutzen: in diesem Fall um bestimmte Moleküle zu identifizieren. Auf diesem Feld arbeitet das HIF mit führenden Herstellern von Hyperspektralkameras wie SPECIM in Finnland und Telops in Kanada zusammen. Nur so konnten einzigartige und innovative Sensoren erworben werden, die das gesamte elektromagnetische Spektrum vom sichtbaren bis zum langwelligen Infrarot abdecken. Das Helios Lab enthält beispielsweise ein laserinduziertes Fluoreszenz-Instrument (LIF), das die direkte Charakterisierung von Seltenerdelementen ermöglicht, sowie einen Laserprofiler, mit dem wir die 3D-Oberfläche von Objekten abbilden können. Aber auch eine Langwellen-Infrarotkamera gehört zur Ausstattung. Sie kann verschiedene Kunststoffe erkennen, darunter auch die bisher gefürchteten – weil schwer zu trennenden – schwarzen Kunststoffe.

Insgesamt kommen im Helios Lab zurzeit folgende Sensoren zum Einsatz (Abb 1):

- RGB: 2 Vollbild-RGB-Sensoren, Teledyne Nano C4020 mit einer räumlichen Auflösung von 4112 x 3008 px, einer Bildgeschwindigkeit von 20 fps und einer Sensorpixelgröße von 3,45  $\mu\text{m}$

## Kontakt

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Chemnitz Str. 40, 09599 Freiberg  
r.gloaguen@hzdr.de

- Laserhöhenprofiler: Teledyne Nano C4030 mit einer räumlichen Auflösung von 4112 x 2176 px, einer Bildgeschwindigkeit von 27 fps und einer Sensorpixelgröße von 3,45 µm
- Laserinduzierte Fluoreszenz (VNIR-Bereich): Specim V10E sCMOS-Sensor mit einem Spektralbereich von 400-1000 nm, einer räumlichen Auflösung von 2184 Pixel, einer spektralen Auflösung von 946 Bändern und einer Bildgeschwindigkeit von 100 FPS
- Reflektanz (VNIR-Bereich): Specim-FX17, ein Zeilenscan-Sensor mit einem Spektralbereich von 900-1700 nm, einer räumlichen Auflösung von 640 Pixel und einer spektralen Auflösung von 224 Bändern mit einer Bildgeschwindigkeit von 527 FPS; sowie Specim-FX10, eine Zeilenscan-Sensor mit einem Spektralbereich von 400-1000 nm, einer räumlichen Auflösung von 1024 Pixel und einer spektralen Auflösung von 224 Bändern mit einer Bildgeschwindigkeit von 330 FPS
- Reflektanz (MWIR-Bereich): Specim-FX50, ein Zeilenscan-Sensor mit einem Spektralbereich von 2,7- 5,3 µm, einer räumlichen Auflösung von 640 Pixel und einer spektralen Auflösung von 154 Bändern mit einer Bildgeschwindigkeit von 380 FPS; sowie Telops HS-MWIR-Sensor, Spektralbereich von 3-9 µm, räumliche Auflösung von 320 x 100 Pixel und spektrale Auflösung von 150 Bändern
- Reflektanz (LWIR-Bereich): Specim-OWL mit einem Spektralbereich von 8 bis 12 µm, einer räumlichen Auflösung von 384 Pixel und einer spektralen Auflösung von 84 Bändern bei einer Bildgeschwindigkeit von 100 fps.

Durch das breite Spektrum an Sensoren kann das System heterogene Datentypen (auch in Bezug auf spektrale Auflösung, Abdeckung und räumliche Auflösung) erfassen, um Materialien von Interesse genau zu identifizieren. Dabei ist die Fusion von Daten mit hoher räumlicher Auflösung und solchen mit hoher spektraler Auflösung für die Charakterisierung des typischerweise stark heterogenen Materialstroms unabdingbar.

Neben anderen Herausforderungen hinsichtlich der Daten-Vorverarbeitung (Entrauschen und Datenregistrierung) und Auswertung ist eine immense Datenmenge zu bewältigen. Allein die FX10-Kamera erzeugt bei 330 FPS einen Durchsatz von 0,15 GB/s. Die kontinuierliche Erfassung aller Sensordaten ergibt somit etwa 5 Gbit an sekundlich zu übertragenden Daten, die auf dem Server geschrieben, vorverarbeitet und für das Training in dichten, neuronalen Netzen nahezu augenblicklich verarbeitet werden müssen. So entstehen im Schnitt für 1-2 Meter analysiertem Material mehr als 50 GB Daten, im Regelbetrieb sind allerdings Hunderte bis Tausende von Förderbandmetern zu erwarten. Die Analyse derart umfangreicher Datensätze in Echtzeit stellt große Herausforderungen an die Hardware und verwendeten Algorithmen. Um das Beste aus diesen einzigartigen Sensoren herauszuholen, haben wir auf Basis von Deep Learning schnelle Verfahren zur Klassifizierung der sich auf dem Förderband bewegenden Teile entwickelt. Der Hauptvorteil von Deep Learning im Vergleich zu herkömmlichen Techniken des maschinellen Lernens besteht darin, dass es automatisch direkt aus Rohdaten lernen kann, ohne handcodierte Regeln oder Nutzer-Kenntnisse zu benötigen. Seine hochflexiblen Architekturen können Ende-zu-Ende

lernen, mit einer signifikanten Leistungsverbesserung, wenn viele Daten bereitgestellt werden.

Wir haben daher einen Objekterkennungsansatz entwickelt, um RGB-Bilder mit hoher räumlicher Auflösung mit hyperspektralen Bildern mit hoher spektraler Auflösung zu integrieren, und so recycelbare Objekte und Elemente zu erkennen. Um das Fusionsnetzwerk zu trainieren, können wir nur eine begrenzte Menge an Trainingsdaten aus dem Multi-sensor-Setup und Open-Source-Online-Daten bereitstellen. Im Gegensatz zu herkömmlichen multimodalen Netzwerken, die Trainingsdaten in der Größenordnung von Tausenden von Bildern benötigen, ist unser GOL-basiertes FASTER rCNN (Guided Object Localization Region-Based Convolutional Neural Network) in der Lage, Objekte anhand eines sehr kleinen Trainingsdatensatzes zu erkennen. Dies ist bei der Materialstromanalyse besonders sinnvoll. Das Modell ist in der Lage, die hohe Genauigkeit der Klassifikation bei der Lokalisierung der Komponenten zu nutzen. Einfach ausgedrückt: die aufgezeichneten spektralen Eigenschaften werden verwendet, um ein Objekt eines bestimmten Materials zu lokalisieren, während die räumlichen Eigenschaften (gegeben durch die hochauflösenden RGB-Daten) verwendet werden, um das lokalisierte Objekt zu klassifizieren. Somit erreicht dieses Modell eine Objekterkennung unter Verwendung der räumlich-spektralen Merkmale des Objekts.

Doch das ist nur der Anfang der Geschichte: auch wenn hyperspektrale Sensoren erstaunliche Werkzeuge sind um bestimmte Moleküle schnell zu charakterisieren, können sie nicht alle Wertstoffe detektieren und scheitern zum Beispiel bei der Identifikation bestimmter Legierungen. Daher entwickeln wir derzeit weitere smarte Sensoren, die eine genaue Analyse der chemischen Zusammensetzung durchführen können. Die Genauigkeit setzt allerdings eine technische Limitierung hinsichtlich der Messgeschwindigkeit, und erlaubt somit aus Zeitgründen die Messung nur an ausgewählten Orten. Die Sensoren setzen diese Messpunkte - unterstützt durch Deep-Learning-Algorithmen - auf smarte Weise und analysieren die Oberfläche von Objekten nur dort, wo es sinnvoll ist. In diesem Zusammenhang entwickeln wir derzeit ein entsprechendes Raman-Spektrometer. Dieses Instrument kann komplexe Gläser, Kunststoffe und organische Verbindungen charakterisieren. Und das ist noch lange nicht das Ende: Helios Lab hat kürzlich eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik an der TU Freiberg begonnen. Gemeinsam wollen wir uns nun der intelligenten Sortierung und dem Recycling von Lithiumbatterien und Wasserstoffzellen widmen. Denn, auch wenn erneuerbare Energien umweltfreundlicher sind als fossile Brennstoffe, erzeugen insbesondere auch sie komplexe Abfälle.

Das ultimative Ziel ist es, jedes Objekt auf dem Förderband vollständig abzubilden, um sowohl gefährliche als auch wertvolle Komponenten zu identifizieren und die erforderlichen Informationen für eine angepasste Weiterverarbeitung bereitzustellen - und das in Echtzeit. Es ist noch ein weiter Weg, aber das Helios Lab wird der Industrie hoffentlich schon bald die Technologien zur Verfügung stellen können, die zur Verbesserung des Recyclings dringend benötigt werden.