

25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

am 22. und 23. September 2021 in Magdeburg

Eine Veranstaltung von:



Technische Universität München
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)



Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik
Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM)



IBAF Engineering GmbH

in fachlicher Trägerschaft
des VDI-Fachausschusses 307 Schüttgut-Fördertechnik



Gesellschaft Produktion und Logistik
Fachausschuss 307

25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

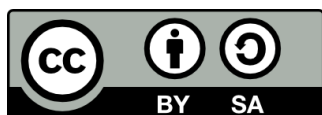
Herausgegeben als Begleitband zur gleichnamigen Fachtagung
am 22. und 23. September 2021 in Magdeburg

Herausgeber:

André Katterfeld, Friedrich Krause, Johannes Fottner, Willibald A. Günthner,
Dagmar Pfeiffer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 Lizenz (BY-SA). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell, sofern der neu entstandene Text unter derselben Lizenz wie das Original verbreitet wird.

(Lizenz-Text: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>)

Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z. B. Schaubilder, Abbildungen, Fotos und Textauszüge erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Erschienen 2021 im Universitätsverlag Magdeburg

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en) 2021.

Umschlaggestaltung: Arnhild Gerecke

Druck: WIRmachenDRUCK GmbH, Backnang

ISBN: 978-3-948749-04-0

<https://doi.org/10.25673/36794>

Alle Rechte vorbehalten

Manuskriptvordrucke. Die Autoren zeichnen für ihre Beiträge selbst verantwortlich. Die Herausgeber übernehmen keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung der Rechte Dritter. Schadenersatz für fehlerhafte, unvollständige oder nicht abgedruckte Beiträge ist ausgeschlossen. Die Reproduktion der veröffentlichten Artikel ist ohne Genehmigung der Herausgeber nicht gestattet.

25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

Automatisierungs- und Überwachungsmethoden mittels Infrarotthermographie in rauen Umgebungen

Tobias Wendel-Eichholz
Felix Leaman Weiffenbach
Elisabeth Clausen



Tobias Wendel-Eichholz, M. Sc.
Dr.-Ing. Felix Leaman Weiffenbach
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen
Institute for Advanced Mining
Technologies, RWTH Aachen University
Wüllnerstr. 2
52056 Aachen

Automatisierungs- und Überwachungsmethoden mittels Infrarotthermographie in rauen Umgebungen

Aufgrund anspruchsvoller Umgebungsbedingungen im Schwermaschinenbau und dabei insbesondere im Bergbau stoßen herkömmliche bildgebende Verfahren, wie z. B. Laser-scanner, RGB-Kameras oder im optischen Bereich arbeitende Videosysteme, schnell an ihre Grenzen. Allerdings sind bildgebende Verfahren zur Prozessüberwachung, -automatisierung und -steuerung in vielen Industriezweigen weit verbreitet.

Für die herausfordernden und vielfältigen Anwendungsgebiete eignet sich das am Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) bereits seit Jahrzehnten genutzte bildgebende Verfahren basierend auf langwelligen Infrarotkameras (LWIR-Kameras). In vielen industrienahen Projekten kommen LWIR-Kameras aufgrund ihrer Vorteile gegenüber anderen bildgebenden Verfahren wie z. B. Unempfindlichkeit gegenüber Staubpartikeln in der Luft, zur Automatisierung und Prozesssteuerung zum Einsatz. So wurden mittels Bildauswertung der LWIR-Bilder verschiedene Stoffströme in Echtzeit analysiert, Tragrollen an Bandsystemen überwacht oder eine Abscheidung zu heißen Materialien vorgenommen. Die beschriebenen Applikationsbeispiele zeigen einen Teil der Einsatzbereiche LWIR basierter Bildverarbeitung zur Prozess- und Anlagenüberwachung in rauen Umgebungsbedingungen auf.

1 Einleitung

Die zunehmende Erhöhung der Technologisierung, Automatisierung und Digitalisierung ermöglicht dem Bergbau ein Vordringen in immer komplexere und tiefere Lagerstätten. Die Erschließung neuer Lagerstätten führt zu der Notwendigkeit des Transportes größerer Massen. Um die Rohstoff- und Energieversorgung ökonomisch und ökologisch langfristig sichern zu können, bedarf es neuer technischer Lösungen und Prozesse. [1]

Um einen Beitrag zur Automatisierung leisten zu können, bedarf es an die schwierigen Umgebungsbedingungen angepasster Sensoren.

Aufgrund ihrer Eigenschaften eignet sich die Infrarotthermographie (oder auch Wärmebildtechnik) gut für die Prozessautomatisierung und -steuerung in verschiedensten Branchen. Der Einsatz bildgebender Verfahren zur Überwachung von Prozessen bzw. deren Automatisierung ist bereits in vielen Bereichen verbreitet. Als Beitrag zu einem sicheren, effizienten und verantwortungsvollen Bergbau entwickelt das Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen University Technologien und Lösungen für die Automatisierung und Digitalisierung von Bergbaumaschinen und -prozessen. Die aktuelle Forschung des AMT konzentriert sich auf die Entwicklung und Anwendung von robusten Sensortechnologien, die der rauen und herausfordernden Bergbauumgebung gewachsen sind. In Kombination mit fortschrittlicher Datenanalytik unter Verwendung anspruchsvoller Methoden und Algorithmen, für verschiedene Bereiche, mit dem Ziel, das autonome Bergwerk der Zukunft zu gestalten. Diese umfassen derzeit Weiterentwicklungen im Bereich der Materialcharakterisierung, Lokalisierung und Navigation für autonome, mobile Maschinen, Zustandsüberwachung, vorausschauende Wartung und Instandhaltung sowie Prozessautomatisierung.

Das AMT forscht seit mehreren Jahren an der Nutzung der Infrarotthermographie für Anwendungen in der Rohstoff- und Schwermaschinenindustrie, in denen herkömmliche

bildgebende oder andere optische Verfahren häufig an ihre Grenzen stoßen. Die Herausforderung, die Technologie im Bergbau in die Anwendung zu bringen, ergibt sich aus den Umgebungsbedingungen dieser Industriezweige. In vielen Projekten erwies sich die langwellige Infrarotthermographie (LWIR) als geeignetes, bildgebendes Verfahren für die rauen Umgebungsbedingungen. Die genutzten Vorteile von LWIR-Kameras sind die Unempfindlichkeit gegenüber Aerosolen in der Luft, wie Staub- oder Wasserpartikeln, als auch gegenüber mechanischen Belastungen, wie z. B. Vibrationen. Weiterhin kommt hinzu, dass LWIR-Kameras rein passiv arbeiten können und daher unabhängig gegenüber den umgebenden Lichtverhältnissen sind. Aus den genannten Gründen qualifiziert sich die Technologie für die Automatisierung und Prozessüberwachung im Berg- und Schwermaschinenbau sowie in weiteren Industriebereichen. Über die Automatisierung und Prozessüberwachung hinaus eignet sich die Infrarotthermographie weiterhin zur Erhöhung der Sicherheit für Mensch und Maschine.

Die Schwerpunkte des AMT liegen unter anderem in der Überwachung von Förderströmen, um z. B. Bandschiefelauf zu verhindern und auf der Stoffstromanalyse, um Aussagen über dessen Zusammensetzung und den Gehalt des beförderten Materials treffen zu können. Des Weiteren liegen die Forschungsaktivitäten im Bereich der Temperaturüberwachung zur Brandprävention bzw. der Brandfrühsterkennung, der Personenerkennung sowie der generellen Zustandsüberwachung von Prozessen und Abläufen. [2]

Herausforderungen und Probleme in diesen Anwendungsfeldern könnten ebenfalls mit anderen Technologien gelöst werden. Die Beladung und der Schiefelauf können z. B. durch Laserscanner bzw. Endschalter realisiert werden. Eine Aussage über die Zusammensetzung von Stoffströmen kann über das XDR-Verfahren abgebildet werden. Für die Erkennung einer Person auf einem Förderband kann ebenfalls eine transponderbasierte Lösung eine Möglichkeit darstellen. Um absolute Temperaturen messen zu können, kann ein Thermometer genutzt werden.

Alle genannten Lösungen bieten individuelle Vor- und Nachteile. Eine Technologie, welche die bestehenden Lösungen ergänzt oder unter Umständen sogar ersetzen kann, ist die Infrarotthermographie. In Forschungsarbeiten am AMT wurde die Infrarot (IR) Technologie beispielsweise sowohl als alleinstehendes System [3, S. 54], als auch in Kombination mit der Acoustic Emission (AE) Technologie [3, S. 54] „Für eine Erläuterung der AE Technologie siehe [3, S. 52]“, zur Charakterisierung kontinuierlicher Materialcharakterisierung genutzt.

In diesem Kontext werden am AMT seit Jahren erfolgreich ungekühlte LWIR-Kameras eingesetzt. Im Folgenden werden ausgewählte Einsatzfälle für die Prozessüberwachung und –automatisierung exemplarisch aufgeführt und erläutert.

2 Grundlagen der Infrarotthermographie

Die Infrarotthermographie hat sich in den letzten Jahrzehnten weiterentwickelt. Dies ist insbesondere auf die enormen Fortschritte im Bereich der Mikrosysteme, der Infrarot-Detektoren und der Computertechnik zurückzuführen. Die Infrarotthermographie macht die für das menschliche Auge unsichtbare Infrarotstrahlung sichtbar. Auf diese Weise können zusätzliche Informationen gewonnen und komplexe Sachverhalte oder Prozesse vereinfacht werden. [4]

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt gibt Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab. Infrarotstrahlung ist ein Teil dieser elektromagnetischen Strahlung und befindet sich im elektromagnetischen Spektrum zwischen dem sichtbaren Licht und den Mikrowellen. Die emittierte Infrarotstrahlung ist abhängig von der Temperatur des Objekts, des Materials sowie der Oberflächenbeschaffenheit und der Strahlungsrichtung. [5] [6]

Infrarotkameras erfassen die Infrarotstrahlung und stellen sie in Bildern dar. Sie arbeiten häufig im langwelligen Wellenlängenbereich zwischen $8\text{ }\mu\text{m}$ - $14\text{ }\mu\text{m}$ und nutzen eines der sogenannten atmosphärischen Fenster. Im atmosphärischen Fenster wird die emittierte, langwellige Infrarotstrahlung kaum von der Atmosphäre behindert. Bild 1 verdeutlicht, dass die Strahlung mit der Wellenlänge $\lambda_1 < d$ von dem Teilchen/Luftmolekül d reflektiert wird, während die Strahlung mit der Wellenlänge $\lambda_2 > d$ dieses passiert. Der Spektralbereich des atmosphärischen Fensters ist somit ideal für die passive Infrarotmessung geeignet. Außerdem wird die Infrarotstrahlung in diesem langwelligen Bereich im Vergleich zum sichtbaren Licht weniger durch Aerosole beeinflusst. Unter anderem aus diesem Grund sind LWIR-Kameras für die Realisierung von Automatisierungslösungen in rauen Umgebungen geeignet. [7] [8]

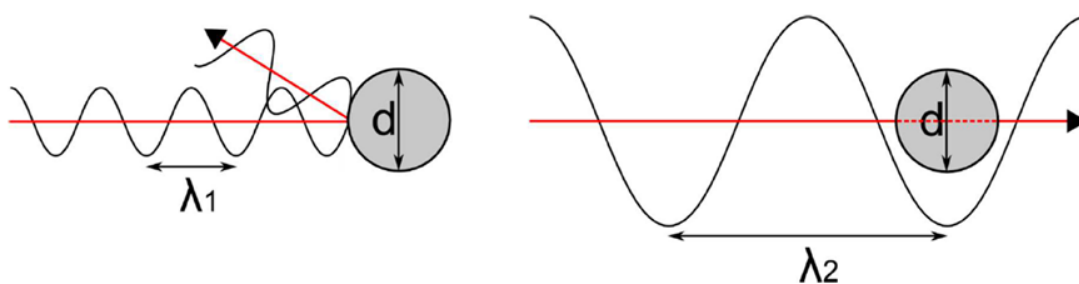


Bild 1: Kurzwelligere Strahlung wird von einem Partikel reflektiert (links), langwelligere Strahlung passiert ihn (rechts)

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Bestimmung von Stoffstromeigenschaften

In der mineralgewinnenden Industrie ist die Stoffstromanalyse in einer Vielzahl von Zusammenhängen relevant. Dabei kann sowohl die Menge des Materialflusses als auch dessen Zusammensetzung von Interesse sein. Die unterschiedliche Abstrahlung verschiedener Materialien bzw. die Zustände lassen im Infrarotbereich Rückschlüsse auf die Zusammensetzung oder das Mischungsverhältnis eines Materialstroms zu. [7]

3.1.1 Bestimmung des Feuchtegrades

Im Rahmen eines Projektes wurde der Feuchtegehalt eines Materialstroms analysiert. Ziel des Projektes war es, den Feuchtegehalt von Kraftwerksasche in Echtzeit zu bestimmen, um die Asche in gleichbleibender Qualität der Weiterverarbeitung zuzuführen. Die Asche wird über einen Pelletierteller mit Wasser vermischt. Zum Weitertransport fällt das gemischte Material auf ein Förderband. In Transportrichtung des Förderbandes ist eine LWIR-Kamera montiert, wie in Bild 2 dargestellt. Bild 3 zeigt Infrarotaufnahmen des Mischgutes mit unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten. Die Aufnahme links zeigt zu feuchtes Mischgut, während die Aufnahme rechts zu trockenes Mischgut zeigt.

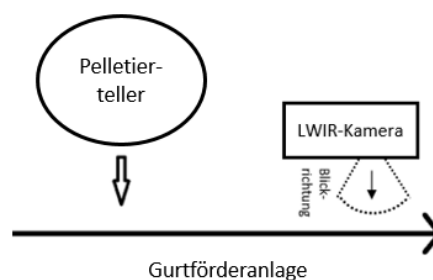


Bild 2: Schematischer Versuchsaufbau

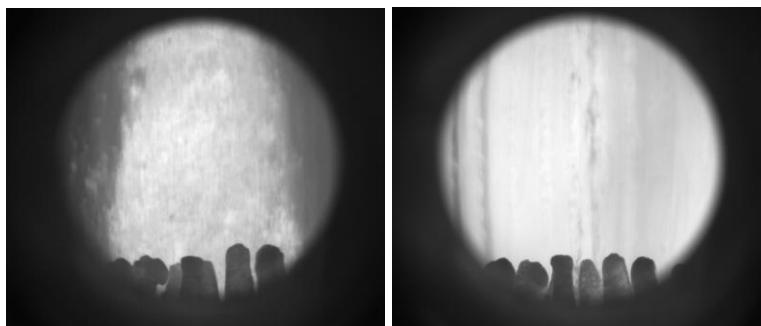


Bild 3: Infrarotaufnahme des Mischgutes

Innerhalb der Analyse werden mit Hilfe von Bildauswertungsalgorithmen Kennwerte für die jeweiligen Zustände erzeugt. Die Algorithmen erzeugen einen Vektor im mehrdimensionalen Raum, der die Eigenschaften des Materialflusses beschreibt. Durch Methoden des Machine Learnings wird der generierte Vektor mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einer definierten Mischgutklasse (zu trocken, gewünschter Feuchtegehalt, zu feucht) zugeordnet. [2]

3.1.2 Hot-Spot Detektion

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für die Analyse mittels LWIR-Kamera ist die Erkennung von erhöhten Temperaturen eines Materialflusses innerhalb eines Trogkettenförderers, einem sogenannten Hot-Spot. Unterschiedliche Temperaturen desselben Materials verursachen einen Unterschied in der Strahlungsintensität, der von der LWIR-Kamera registriert werden kann. Durch entsprechende Bildverarbeitung und -analyse kann das heiße Material zuverlässig erkannt, ein Notprogramm eingeleitet und Brände verhindert werden.

3.1.3 Bestimmung von Stoffstromzusammensetzungen

Aufbauend auf den Erfahrungen bei der Analyse unterschiedlicher Feuchtegehalte in Kraftwerksaschen, oder der Hot-Spot Detektion, wurde das Verfahren auf die Analyse verschiedener Bodentypen eines Tagebaus erweitert. Neben der Analyse mittels LWIR-Kamera wurden gleichzeitig AE Daten an verschiedenen Messpunkten erfasst. Um den Materialfluss der verschiedenen Bodenarten optimal erfassen zu können, wurde die LWIR-Kamera mittig über dem Förderband montiert. Die AE-Messpunkte wurden an den Stellen installiert, an denen der Materialfluss einen freien Fall absolviert und auf ein Prallblech trifft, wie an Bandübergabepunkten. Anhand eines Messprotokolls wurden die Bodenarten eindeutig bestimmt und definierten Zeiträumen zugeordnet. Durch die Kombination verschiedener Kennwerte mittels der Methoden des Machine Learnings konnten auf Basis von Trainingsdaten Vorhersagen bezüglich der geförderten Bodentypen, sowohl auf Basis von IR- (vgl. [9]) als auch von AE-Daten, entwickelt werden. Die Genauigkeit der Vorhersagemodelle lag in dieser ersten Machbarkeitsstudie bei über 85 %. Eine zukünftige Kombination der Analysen beider Sensorsysteme wird die Wahrscheinlichkeit der korrekten Zuordnung einzelner Bodentypen weiter erhöhen.

Nach dem gleichen Prinzip wurde ein Versuch innerhalb eines Kalksteinbruchs zur Detektion von flinthaligen und -freien Materialströmen realisiert. Insgesamt wurden vier AE-Messstellen und eine IR-Messstelle innerhalb der Förderanlage installiert. Dazu wurde eine LWIR-Kamera oberhalb eines Förderbandes installiert. Die AE-Sensoren wurden an verschiedenen Bandübergabestellen angebracht. Durch die Auswertung der generierten Daten sowie die anschließende Entwicklung von Trainings- und Vorhersagemodellen konnte je nach Klassifikationsmodell eine Genauigkeit von mehr als 90 % erreicht werden. [3]

3.2 Beladungsautomatisierung und Bandschieflauferkennung

Gurtförderer, auch Bandförderer genannt, werden häufig für den Massentransport sowohl im Tagebau als auch im Untertagebau eingesetzt. Die Gesamtlänge aller Gurtförderer in einem Tagebau kann mehrere Kilometer betragen. Sie sind aufgrund ihrer strategischen Position für den Massentransport direkt hinter der Bergbauausrüstung unverzichtbar für den Betrieb. Kommt eine Förderanlage zum Stillstand, steht in der Regel auch die vorgelagerte Gewinnungsanlage still und damit möglicherweise auch die Gewinnung des Wertminerals. Aus diesem Grund wurde am AMT im Rahmen eines F&E-Auftrages ein LWIR-kamerabasiertes System zur Überwachung von Bandanlagen entwickelt. [7]

Bild 4 zeigt schematisch die Aufgabenstellung. Bei der mobilen Bandübergabe wird das gewonnene Material über einen Zwischenladewagen auf das Förderband übergeben. Dabei fällt das Material von oben entlang einer Verladerutsche auf das Förderband. Die Transportrichtung des Förderbandes ist in Bild 4 von unten nach oben. Die Verladeschurre hat mehrere Freiheitsgrade relativ zum Band und kann daher nach rechts und links verschoben und in ihrem Winkel verändert werden. Dadurch kann beispielsweise die Beladeposition optimiert werden. Das Material sollte möglichst mittig auf den Gurtförderer geladen werden, da eine ungleichmäßige Beladung zu einem Ausrichtungsfehler des Gurtes im Gurtförderer führen kann. Eine Fehlausrichtung führt zu erhöhtem Verschleiß und bei extremer Schiefelage des Gurtes zu Schäden an den Gurtkanten und den Gerüsten. [5] [7]

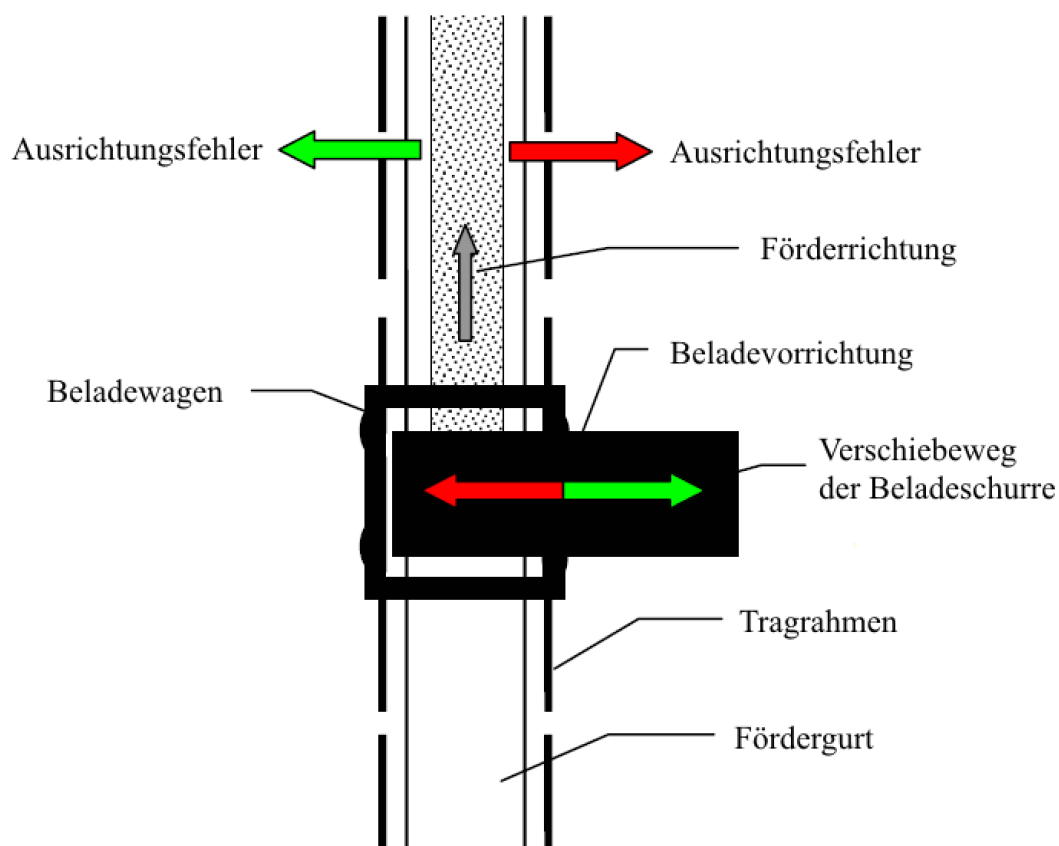


Bild 4: Schematische Darstellung der Bandbeladung [5]

Für die Lösung dieser Aufgabenstellung wurden an der mobilen Bandübergabe drei LWIR-Kameras installiert. Eine Kamera nimmt Infrarotbilder von der eigentlichen Materialübergabe im Bereich der Schurre auf (vgl. Bild 5). Durch Auswertung des LWIR-Bildes kann auf den Beladungsquerschnitt geschlossen und dadurch die Position der Materialaufgabe bestimmt werden. [5]

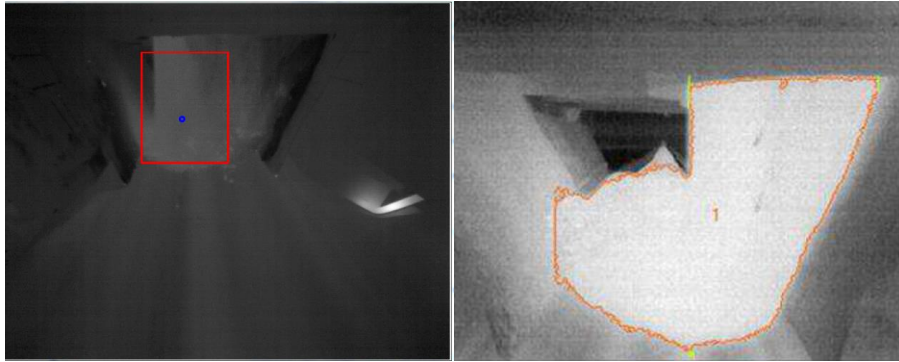


Bild 5: Auswertung des LWIR-Bildes
Beladungsposition (links) und Flächenschwerpunkt (rechts)

Die beiden anderen LWIR-Kameras wurden vor und hinter der Bandübergabestelle, oberhalb des Bandes, mit Blick auf das einlaufende und auslaufende Band installiert. Bild 6 zeigt ein Beispiel für ein Bild des auslaufenden Bandes. Diese Bilder dienen zur Bestimmung der Bandposition, d. h. zur Detektion eines möglichen Bandschiefelaufs, sowohl vor als auch hinter der Verladeschurre. [5]



Bild 6: Bild des beladenen Fördergurtes [5]

Die Bandposition kann ebenfalls über Bildverarbeitungsalgorithmen ermittelt werden. Dazu wird auf beiden Seiten des Förderbandes, über verschiedene Kantenerkennungsalgorithmen, die Abweichung von der definierten Sollposition der Bandkante ermittelt. Durch die Kombination aller Informationen kann die Position der Schurre und damit die Materialzufuhr durch den Bediener oder ein Automatisierungssystem optimiert werden. Dieses Überwachungssystem ermöglicht eine Erhöhung der Verfügbarkeit bei gleichzeitiger Verschleißreduzierung und damit einhergehend eine Kostenreduzierung. [7]

3.3 Erhöhung der Sicherheit durch automatisierte Personenerkennung unter Tage

Basierend auf den in vorherigen Projekten gesammelten Erfahrungen und der einzigartigen Eigenschaften der Infrarotthermographie, war das AMT an der Durchführung eines Projektes beteiligt, in dem die Personenerkennung auf einem Förderband, in der Steinkohle, entwickelt werden sollte.

Die Umsetzung umfasste die Vorverarbeitung mit standardisierten und spezifisch entwickelten Algorithmen unter Laborbedingungen sowie die Messungen unter Bergbau- bzw. Realbedingungen. Zur Entwicklung des Personenerkennungssystems wurde eine Datenbank mit verschiedenen Bildkategorien erstellt. Für jede Bildkategorie wurde ein zusammenfassender, beschreibender Merkmalsvektor konfiguriert, mit dem Ziel, Personen auf einem laufenden Förderband zu erkennen. Die generierten Ergebnisse zur Unterscheidung zwischen Personen und Kohle auf dem laufenden Förderband sowie einem leeren Förderband, ermöglichen eine Personendetektion. [10]

Bild 7 zeigt das Ergebnis des Projektes. Die Unterscheidung zwischen einem leeren Band (links), einem mit Kohle beladenen Band (Mitte) und einer Person auf dem Band (rechts) war erfolgreich. Bei der Erkennung der Personen wurden alle theoretisch möglich einnehmbaren Positionen der Person berücksichtigt. So können schwere Unfälle bei Verpassen des Ausstiegs vermieden werden. Somit trägt das System nicht nur zur Prozessautomatisierung bei, sondern auch zur Erhöhung der Sicherheit.

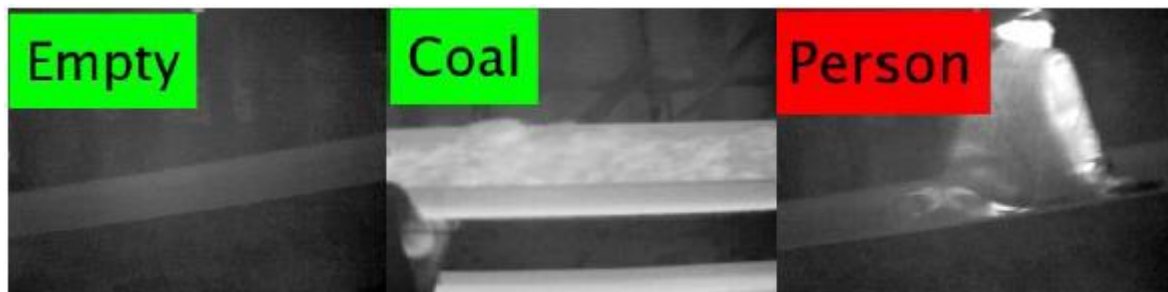


Bild 7: Ergebnis der Personenerkennung [10]

Zusammenfassung

Der Bergbau wird in der Bevölkerung oft mit einer staubigen, schmutzigen, dunklen und gefährlichen Arbeitsumgebung in Verbindung gebracht. Diese Vermutung liegt auch nicht fern, da Bergleute oft unter schwierigsten Bedingungen arbeiten. Um die Sicherheit und Produktivität eines Bergbaubetriebs bei diesen Bedingungen zu erhöhen, ist die Digitalisierung und Automatisierung bestimmter Prozesse von großer Bedeutung. Aufgrund der Unsicherheit und Unvollständigkeit von Informationen, die für die Prozessautomatisierung notwendig sind, steht die Automatisierung im Bergbau vor einer Vielzahl von Herausforderungen. Eine Herausforderung ist es, die Erfahrung der Bediener und Laboruntersuchungen mit einer Technologie zu vereinen und abzubilden.

Die Infrarotthermographie deckt durch ihre Vorteile, wie die wellenlängenbedingte Unempfindlichkeit gegenüber Partikeln in der Luft, die Unabhängigkeit von externen Lichtquellen, ihre Robustheit und die Möglichkeit, passiv zu messen, ein Spektrum für Lösungsansätze ab, um diesen Herausforderungen zu begegnen.

Aus den aufgezeichneten Rohdaten werden mittels Bildverarbeitung die wichtigsten Informationen extrahiert. So werden z. B. bei der Beladeautomatisierung und der Bandschieflauferkennung geometrische Informationen verarbeitet, um den Beladequerschnitt und den Bandschieflauf zu berechnen. Bei der Bestimmung des Feuchtegrades, der Materialcharakterisierung, der Hot-Spot Detektion und der Personenerkennung basiert die Auswertung auf einer Kombination aus unterschiedlichen Strahlungsintensitäten und geometrischen Informationen.

Durch die bisher erfolgreich absolvierten Projekte ist die Infrarotthermographie in der Lage, einen Beitrag zu Digitalisierungs- und Automatisierungslösungen von Prozessen zu leisten.

Quellenverzeichnis:

- [1] Baltes, R.: Einsatzmöglichkeiten von langwelligen Infrarotkameras in rauen Umgebungsbedingungen. Thermographie-Kolloquium 2015
- [2] Eichentopf, B.; Wendel, T.; Baltes, R.; Nienhaus, K.: Applikationsbeispiele von LWIR Kameras zur Prozessüberwachung und Automatisierung. Tagungsband AKIDA 2016, S. 27 – 36, Aachen, 2016
- [3] Wendel, T.; Vraetz, T.; Baltes, R.; Nienhaus, K.; Clausen, E.: Inline-Analysen von Stoffströmen mittels Machine Learning in der Rohstoffindustrie. Georesources (ISSN: 2364-8414), 2019. S. 51 - 56
- [4] Vollmer, M.; Möllmann, K.: Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications. Wiley-VCH, Weinheim, 2013
- [5] Nienhaus, K.; Warcholik, M.; Büschgens, C.; Müller, D.: Belt Positioning and Skewing Revention in Lignite Mining Using Long-Wavelength Infrared Cameras. 12th International Symposium on Continuous Surface Mining (ISCSM), Aachen, 2014
- [6] Schuster, N.; Kolobrodov, V. G.: Infrarotthermographie. Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- [7] Bartnitzki, T.: Forschung für den Bergbau 4.0. Bergbau, Energie und Rohstoffe 2015. S. 234 – 240
- [8] Nienhaus, K.; Pretz, T.; Wotruba, H.: Sensor Technologies: Impulses for the Raw Materials Industry. Shaker, Aachen, 2014
- [9] Wendel, T.: Stoffstromanalyse zweier Mischböden unter Zuhilfenahme von Infrarotthermographie. Masterarbeit an der RWTH Aachen University, Aachen, 2017
- [10] Uth, F.; Polnik, B.; Kurpiel, W.; Kriegsch, P.; Baltes, R.; Clausen, E.: An innovative person detection system based on thermal imaging cameras dedicate for underground belt conveyors. Mining Science (ISSN 2300-9586), Vol. 26, 2019. S. 263 – 276