

Entwicklung und Erprobung eines thermographischen Ansatzes zur Kunstharzerkennung bei der Installation von Gebirgsankern

Violetta Storoschewich

Entwicklung und Erprobung eines thermographischen Ansatzes zur Kunstharzerkennung bei der Installation von Gebirgsankern

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Violetta Storoschewich, M. Sc. RWTH

Berichtende: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld

Tag der mündlichen Prüfung: 19.01.2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

**ASRE - AACHENER SCHRIFTEN ZUR ROHSTOFF- UND ENTSORGUNGSTECHNIK
DES INSTITUTE FOR ADVANCED MINING TECHNOLOGIES**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen

AMT - Institute for Advanced Mining Technologies der RWTH Aachen University

Wüllnerstraße 2 • D-52062 Aachen

Tel.: +49 241 80 95680 • Fax: +49 241 80 92311

Internet: www.amt.rwth-aachen.de • E-Mail: info@amt.rwth-aachen.de

1. Auflage Aachen:

Verlag R. Zillekens, 2024

Aachener Schriften zur Rohstoff- und Entsorgungstechnik, Band 109

ISBN: 978-3-941277-52-6

© 2024 Violetta Storoschewich

Verlag R. Zillekens

Rainweg 19 • 52224 Stolberg

Tel.: +49 2408 958216 • Fax: +49 2408 958217

E-Mail: verlag@druckservice-zillekens.de

Gesamterstellung

Druckservice Zillekens

Rainweg 19 • 52224 Stolberg

Tel.: +49 2408 958216 • Fax: +49 2408 958217

Internet: www.druckservice-zillekens.de • E-Mail: verlag@druckservice-zillekens.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <https://dnb.dnb.de> abrufbar.

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2024)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institute for Advanced Mining Technologies an der RWTH Aachen University. Mein herzlichster Dank gilt Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen für die fachliche und moralische Unterstützung sowie die Betreuung dieser Arbeit. Der Austausch mit Ihnen und Ihre Anmerkungen waren sehr wertvoll für das Verfassen meiner Dissertation. Auch danke ich Ihnen für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die gewährten wissenschaftlichen Freiheiten, die in vielen Erkenntnisgewinnen und einer Patentanmeldung resultierten. Danke Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld für das Interesse an meinem Themengebiet und die bereitwillige Übernahme des Zweitgutachtens. Für den Vorsitz in der Prüfung und die juristische Perspektive danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. jur. Walter Frenz.

Bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Nienhaus bedanke ich mich für die ermutigenden Worte zur Promotion und die Anstellung als wissenschaftliche Mitarbeiterin. Meinen derzeitigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen danke ich für das angenehme Arbeitsklima und die immer wieder gewährte Hilfsbereitschaft. An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei meinem langjährigen Bürokollegen, Pablo Muñoz Sánchez, für die konstruktiven Gespräche und die gemeinsamen Pausen bedanken. Auch danke ich meinen studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräften sowie Abschlussarbeitern, die mich durch ihre Mitarbeit ebenfalls bei diversen Aufgaben tatkräftig unterstützt haben.

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden zu einem großen Teil im Rahmen des vom EIT RawMaterials geförderten Forschungsprojekts „Automated Bolt Reload“ erarbeitet. Vielen Dank an dieser Stelle an den Fördergeber für die finanzielle Unterstützung und die beteiligten Projektpartner für die fruchtbare Zusammenarbeit. Besonders danke ich dem Bergwerksbetreiber LKAB und dem Maschinenhersteller Epiroc für die Ermöglichung der untertägigen Messungen sowie die Unterstützung vor Ort.

Ein großes Dankeschön gebührt meiner Familie und meinen Freunden, die mir stets die Daumen gedrückt und mich auf diesen Weg unterstützt haben. Mein größter Dank gilt schließlich meinem Partner Alexander Schürmann. Danke, dass Du in allen Promotionsphasen an meiner Seite warst, mich mit viel Geduld unterstützt und stets motivierende Worte gefunden hast. Ohne Dich an meiner Seite wäre mir das Gelingen meines Promotionsvorhabens um einiges schwerer gefallen.

Kurzfassung

Der Ankerausbau ist eine bedeutende Methode zur Gebirgssicherung im untertägigen Bergbau, stellt jedoch eine anspruchsvolle und zeitaufwendige Tätigkeit dar. Angetrieben durch den Wunsch nach einer vollumfänglichen Automatisierung und Effizienzsteigerung des Ankerbohr- und -setzprozesses werden die Installationsmethoden stetig weiterentwickelt. Ein wichtiger Aspekt dabei ist der Einsatz von pumpfähigem Kunstharz als Ankermörtel zur Ankerverklebung. Bei der automatischen Kunstharzinjektion gehört die Einbringung einer zuvor festgelegten, fixen Menge Kunstharz zum Stand der Technik. Lokal variierende Gebirgsbedingungen finden dabei keine Berücksichtigung. Daher ist bislang ein manueller Eingriff erforderlich, wenn Kunstharz während eines Injektionsvorgangs aus dem Bohrloch austritt. Um die automatische Kunstharzinjektion bedarfsgerecht zu gestalten, ist eine sensorbasierte Erkennung eines Kunstharzaustritts während des Injektionsvorgangs notwendig. Beim exothermen Aushärtvorgang steigt die Temperatur des Kunstharzes über die Umgebungstemperatur an. Dabei wird Energie in Form von Wärme abgegeben. Die Infrarotthermographie kombiniert die Vorteile bildgebender Verfahren mit denen einer Temperaturerfassung und ist daher als Sensortechnologie von besonderem Interesse für diese Aufgabe. In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung und Erprobung eines sensorbasierten Ansatzes zur Kunstharzerkennung basierend auf Infrarotthermographie beschrieben. Die spezifizierten Anforderungskriterien sind Genauigkeit, Geschwindigkeit, Integrierbarkeit und Flexibilität.

Die Machbarkeit der Integration des Infrarotkamarasystems wurde durch eine Testmessung im untertägigen Eisenerzbergwerk Kiruna des schwedischen Bergwerksbetreibers LKAB nachgewiesen. Die dabei gewonnenen Daten bildeten die Basis für die Entwicklung des thermographischen Ansatzes. Anhand einer Validierungsmessung in zwei weiteren Strecken des gleichen Bergwerkes wurde der entwickelte Algorithmus anschließend erfolgreich erprobt.

Bei einem Kunstharzaustritt steigt der maximale Graustufenwert im Sichtfeld der Kamera durch die erhöhte Temperatur des Kunstharzes an. Jedoch ist eine alleinige Überwachung des maximalen Graustufenwerts nicht ausreichend, um eine zuverlässige Kunstharzerkennung zu realisieren. Wechselhafte Umgebungsbedingungen können die Lage der Absolutwerte beeinflussen. Zusätzlich treten intern im Messsystem Effekte auf, die ebenfalls einen Einfluss auf den Verlauf der Graustufenwerte haben. Um diese Einflüsse bestmöglich zu kompensieren wurde ein relativer Ansatz verfolgt.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine zuverlässige Erkennung auf Grundlage des entwickelten Ansatzes nachgewiesen werden. Für keine der Messungen wurde irrtümlich auf einen Kunstharzaustritt geschlossen. Der Einsatz eines anderen Kamerasystems in der Validierungsmessung belegte die flexible Übertragbarkeit des Ansatzes. Abhängig von der Installationsposition im Streckenmantel wurde teilweise die Sicht auf den zu installierenden Anker durch die Anordnung der Maschinenteile beeinträchtigt. Daher wurden konstruktive Anpassungen identifiziert, um diese Sichteinschränkungen zu minimieren.

Abstract

English title: Development and testing of a thermographic approach for resin detection during the installation of rock bolts

Rock bolting is an important method for rock reinforcement in underground mining. However, it is a demanding and time-consuming task. Driven by the desire to fully automate the process and to increase its efficiency, the installation methods are constantly being developed further. An important aspect is the use of pumpable resin as a bonding agent for bolt installation. For the automatic resin injection, the application of a previously defined, fixed quantity of resin is state of the art. Locally varying rock conditions are not taken into account. Consequently, manual intervention is still required if resin escapes from the borehole during the injection process. To ensure that the automatic resin injection is tailored to the needs, a sensor-based detection of resin escape during the injection process is necessary. During the exothermic curing process, the temperature of the resin increases above the ambient temperature. Thereby, energy is released in the form of heat. Infrared thermography combines the advantages of vision systems and those of temperature measurement devices and is therefore a sensor technology of special interest for this task. In this thesis the development and testing of a sensor-based approach for resin detection based on infrared thermography are described. The specified requirement criteria are accuracy, speed, integrability, and flexibility.

The feasibility of integrating the infrared camera system was proved by a test measurement in the underground iron ore mine Kiruna, owned by the Swedish mine operator LKAB. The acquired data formed the basis for the development of the thermographic approach. By means of a validation measurement in two other drifts of the same mine, the developed algorithm was then successfully tested.

In case of a resin escape in the camera's field of view, the maximum grayscale value rises due to the increased temperature of the resin. However, the monitoring of the maximum grayscale value alone is not sufficient to realize a reliable resin detection. Varying ambient conditions can influence the level of the absolute values. In addition, internal effects in the measurement system influence the course of the grayscale values. To compensate for these influences in the best possible manner a relative approach was taken.

In this thesis a reliable detection based on the developed approach could be proven. For none of the measurements a resin escape was erroneously inferred. The use of another camera system in the validation measurement demonstrated the flexible transferability of the approach.

Abstract

Depending on the installation position in the drift, the view of the bolt being installed was sometimes obstructed by machine parts. Therefore, design adjustments were identified to minimize these sight restrictions.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1 Einleitung	1
2 Automatisierung des Ankerbohr- und -setzprozesses.....	5
2.1 Grundlagen des Ankerausbaus.....	5
2.1.1 Einteilung von Ankern anhand des Verbundelements gemäß DIN 21521-1	7
2.1.2 Einsatz von Zementmörtel als Ankermörtel.....	9
2.1.3 Einsatz von Kunstharz als Ankermörtel	10
2.2 Aufbau eines Ankerbohrwagens	12
2.3 Aktuelle Entwicklungen bei der Installation von Ankern mittels vollmechanisierter Ankerbohrwagen und die Bedeutung von pumpfähigem Kunstharz	15
2.3.1 Dreischrittige Installationsmethoden	15
2.3.2 Zwei- und einschrittige Installationsmethoden	17
2.3.3 Stand der Technik zur automatischen bedarfsgerechten Kunstharzinjektion	19
2.4 Anforderungen an eine sensorbasierte Kunstharzerkennung.....	21
3 Technologien zur sensorbasierten Kunstharzerkennung.....	23
3.1 RGB-Kamera	23
3.2 Berührende Temperaturmessung mit Widerstandsthermometer und Thermoelement.....	26
3.2.1 Widerstandsthermometer	26
3.2.2 Thermoelement	27
3.3 Berührungslose Temperaturmessung mit Pyrometer und IR-Kamera	29
3.3.1 Physikalische Grundlagen	29
3.3.2 Pyrometer.....	32
3.3.3 IR-Kamera.....	33
3.4 Bewertung relevanter Sensortechnologien im Hinblick auf einen Einsatz zur Kunstharzerkennung.....	38
4 Ansatz zur Erkennung eines Kunstharzaustritts mittels Infrarotthermographie....	43
4.1 Aufbau des IR-Kamerasystems.....	43

4.1.1	Positionierung auf dem Ankerbohrwagen	44
4.1.2	Kameraauswahl.....	48
4.1.3	Gehäusekonzept	54
4.1.4	Datenaufnahme	58
4.2	Laboruntersuchungen zum Einfluss der Umgebungstemperatur	59
4.2.1	Versuchsaufbau	59
4.2.2	Kamerabetrieb über mehrere Stunden.....	61
4.2.3	Kamerabetrieb bei verschiedenen Umgebungstemperaturen	64
4.2.4	Zwischenfazit.....	67
4.3	Untersuchungen zum Kunstharzaustritt während des Injektionsvorgangs	68
4.3.1	Visuelle Begutachtung des Kunstharzaustritts anhand des Bildmaterials.....	68
4.3.2	Durchschnittliche Graustufenwerte für Gestein, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz	69
4.3.3	ROI-Wahl.....	74
4.3.4	Minimaler und maximaler Graustufenwert sowie Spannweite	77
4.4	Vorstellung des Ansatzes zur Kunstharzerkennung	87
5	Validierung des Ansatzes zur Kunstharzerkennung	91
5.1	Untersuchungen zum minimalen und maximalen Graustufenwert sowie der Spannweite.....	93
5.2	Anwendung des thermographischen Ansatzes	97
6	Bewertung des entwickelten thermographischen Ansatzes zur Kunstharzerkennung und Ausblick	99
7	Zusammenfassung	109
	Literaturverzeichnis.....	113
	Anhang	119

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Installation von Ankern, in Anlehnung an [6]	7
Abbildung 2-2: Spreizanker [6].....	8
Abbildung 2-3: Reibrohranker als Schlitzrohranker [6]	8
Abbildung 2-4: Mörtelanker [6].....	9
Abbildung 2-5: Zeitlicher Verlauf der Kunstharztemperatur	12
Abbildung 2-6: Ankerbohrwagen Boltec M10 [25]	13
Abbildung 2-7: Bohrlafette mit wesentlichen Komponenten, in Anlehnung an [5].....	14
Abbildung 2-8: Einschrittige Installationsmethode mit SDA-Anker und Zweikomponenten-Kunstharz, in Anlehnung an [7, 16, 30]	18
Abbildung 3-1: Strahlungsspektrum mit sichtbaren Spektralbereich und infraroten Spektralbereich sowie dessen Einteilung, in Anlehnung an [43].....	24
Abbildung 3-2: Aufbau eines Bayer-Musters, in Anlehnung an [44–46].....	26
Abbildung 3-3: Schematischer Aufbau eines Mantel-Widerstandsthermometers, in Anlehnung an [49].....	27
Abbildung 3-4: Funktionsprinzip eines Thermoelements mit Ausgleichsleitungen, in Anlehnung an [38, 39].....	28
Abbildung 3-5: Plancksches Strahlungsgesetz für Temperaturen von 0 °C bis 200 °C in linearer Darstellung [52].....	31
Abbildung 3-6: Unterschiede in der Bilddarstellung mit RGB-Kamera (links) und IR- Kamera (rechts) im mittel- und langwelligen IR-Bereich am Beispiel der Ankerinstallation, in Anlehnung an [43]	35
Abbildung 3-7: Kunstharzaustritt am Ankerkopf im RGB-Bild (links), IR-Bild in Graustufen-Darstellung (mittig) und IR-Bild in Falschfarben-Darstellung (rechts)	35
Abbildung 3-8: Schematischer Aufbau einer IR-Kamera, in Anlehnung an [52].....	36
Abbildung 4-1: Verlauf der Kunstharzinjektion zu verschiedenen Zeitpunkten (Bild 1 bis 4) mit Positionsangabe der ROIs (3 x 3 Pixel) für Maschinenteile, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz, aufgenommen aus einer Kameraposition in Kabinennähe	45
Abbildung 4-2: Zeitlicher Verlauf des Durchschnittswerts für Maschinenteile, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz innerhalb definierter ROIs (3 x 3 Pixel), aufgenommen aus einer Kameraposition in Kabinennähe.....	45

Abbildung 4-3: Positionierung des IR-Kamerasystems im vorderen Bereich des Bohrrarms auf dem Ankerbohrwagen.....	47
Abbildung 4-4: Sichtbehinderung durch Maschinenteile während einer Kunstharzinjektion mit Kunstharzaustritt, aufgenommen aus einer Position im vorderen Bereich des Bohrrarms	48
Abbildung 4-5: Kameraposition im vorderen Bereich des Bohrrarms bei der Ankerinstallation am linksseitigen und rechtsseitigen Stoß	48
Abbildung 4-6: Boson Kamerakern mit VPC-Adapter (links) und Tau2 Kamerakern mit Workswell Modul (rechts).....	49
Abbildung 4-7: IR-Bilder während des Ankerbohrprozesses, aufgenommen mit einem Tau2 Kamerakern und 7,5 mm Objektiv (links) sowie 13 mm Objektiv (rechts)	52
Abbildung 4-8: Gehäusekonzept für Kamera 2 (links) und Kamera 1 (rechts).....	55
Abbildung 4-9: Beschädigung der DLC-Beschichtung eines Germaniumfensters durch direkte Drucklufteinwirkung, aufgenommen mittels Lichtmikroskop	56
Abbildung 4-10: Machbarkeitsprüfung des Reinigungskonzepts (links), Wasser-Sand-Gemisch (rechts)	57
Abbildung 4-11: Schematische Übersicht über die Bestandteile (links: Kontrollbox, Mitte: Touchscreen-Monitor, rechts: IR-Kamera)	58
Abbildung 4-12: Messaufbau in der Klimakammer.....	60
Abbildung 4-13: Position der ROIs auf Anker- und Betonplatte (oben), Graustufenwertentwicklung für ROIs auf der Betonplatte und Temperaturentwicklung (unten)	63
Abbildung 4-14: Zeitlicher Verlauf der Temperatur des FPAs bei Umgebungstemperaturen von 15 °C bis 35 °C	65
Abbildung 4-15: Graustufenwertentwicklung bei Umgebungstemperaturen von 15 °C bis 35 °C jeweils für die ROI Beton_Mitte.....	66
Abbildung 4-16: Zeitlicher Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für Gestein, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz (links) sowie Positionsangabe der ROIs (5 x 5 Pixel) in einem IR-Bild (rechts), Messung VT3 mit Kunstharzaustritt	69
Abbildung 4-17: Zeitlicher Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für Gestein, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz (links) sowie Positionsangabe der ROIs (5 x 5 Pixel) in einem IR-Bild (rechts), Messung VT5 mit Kunstharzaustritt	70
Abbildung 4-18: Zeitlicher Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für Gestein, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz, Messung VT1 (links) und Messung VT2 (rechts)	71

Abbildung 4-19: Zeitlicher Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für Gestein, Ankerplatte und Injektionseinheit (links) sowie Positionsangabe der ROIs (5 x 5 Pixel) in einem IR-Bild (rechts), Messung VT7 ohne Kunstharzaustritt.....	72
Abbildung 4-20: Zeitlicher Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für Gestein, Ankerplatte und Injektionseinheit (links) sowie Positionsangabe der ROIs (5 x 5 Pixel) in einem IR-Bild (rechts), Messung VT12 ohne Kunstharzaustritt.....	73
Abbildung 4-21: Minimaler und maximaler Graustufenwert im Vollbild (1) sowie in rechteckiger ROI (2) und kreisförmiger ROI (3), Messung VT2	75
Abbildung 4-22: Zeitlicher Verlauf der Spannweite für Vollbild sowie rechteckige ROI und kreisförmige ROI, Messung VT2	76
Abbildung 4-23: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite (oben); IR-Bilder 1 bis 4 zu verschiedenen Zeitpunkten des Injektionsvorgangs (unten), Messung VT3 mit Kunstharzaustritt	78
Abbildung 4-24: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite für Messungen mit Kunstharzaustritt, Testmessung (Hinweis: In Messung VT15 ist der Zeitpunkt, wenn der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz liegt, visuell nicht bestimmbar)	80
Abbildung 4-25: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite (oben); IR-Bilder 1 bis 4 zu verschiedenen Zeitpunkten des Injektionsvorgangs (unten), Messung VT7 ohne Kunstharzaustritt	82
Abbildung 4-26: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite für Messungen ohne Kunstharzaustritt, Testmessung	83
Abbildung 4-27: Übersicht der Minimal- und Maximalwertdifferenz für Messungen mit Kunstharzaustritt, Testmessung.....	85
Abbildung 4-28: Übersicht der Minimal- und Maximalwertdifferenz für Messungen ohne Kunstharzaustritt, Testmessung.....	85
Abbildung 4-29: Übersicht der relativen Änderung der Spannweite für Messungen mit (VT1 bis VT6, VT15) und ohne (VT7 bis VT14) Kunstharzaustritt, Testmessung	86
Abbildung 4-30: Schematische Darstellung des Ansatzes zur Kunstharzerkennung.....	87
Abbildung 5-1: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite, Messungen der Kategorie 1	94
Abbildung 5-2: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite, Messung A4 mit Wasseraustritt (grauer Bereich) der Kategorie 2	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Bewertung von Sensortechnologien zur Kunstharzerkennung anhand definierter Anforderungskriterien.....	38
Tabelle 4-1:	Technische Daten der eingesetzten Kamerakerne mit Objektiv [59–65]	51
Tabelle 4-2:	Berechnete IFOV-Werte sowie horizontales und vertikales Sichtfeld verschiedener Kameraobjektive für eine Entfernung von 2 m zum Messobjekt gemäß Formel (4-1) bis (4-4)	54
Tabelle 4-3:	Übersicht über die ermittelten Zeiten für die Messungen mit Kunstharzaustritt, Testmessung.....	89
Tabelle 5-1:	Übersicht über die Injektionszeit, die relative Änderung der Spannweite und den Spannweitenanstieg, Messungen der Kategorie 1	95
Tabelle 5-2:	Übersicht über die ermittelten Zeiten für die Messungen mit Kunstharzaustritt der Kategorie 1, Validierungsmessung	98

Abkürzungsverzeichnis

AMT	Institute for Advanced Mining Technologies
a-Si	Amorphes Silizium
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DLC	Diamond-Like-Carbon
FFC	Flat-Field-Correction
FOV	Field of View
FPA	Focal Plane Array
HFOV	Horizontal Field of View
IFOV	Instantaneous Field of View
IR	Infrarot
LW	Long-Wave
MW	Mid-Wave
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
NUC	Non-Uniformity-Correction
ROI	Region of Interest
ROS	Robot Operating System
SDA	Self Drilling Anchor
SW	Short-Wave
VFOV	Vertical Field of View
VOx	Vanadiumoxid

1 Einleitung

Das frühe 21. Jahrhundert ist geprägt durch ein Spannungsfeld zwischen einem hohen gesamtgesellschaftlichen Interesse an Umweltschutz und einem gleichzeitig steigenden Rohstoffbedarf. Zusätzlich sind oberflächennahe Rohstoffvorkommen zunehmend erschöpft. In Summe führen diese Faktoren zu einer Verlagerung der Rohstoffgewinnung nach unter Tage. [1, 2] Eine große Herausforderung stellen dabei steigende Gebirgsdruckprobleme durch den globalen Trend zum Abbau in größeren Teufen dar. Bei der untertägigen Rohstoffgewinnung wird durch das Auffahren von bergmännischen Hohlräumen der Gleichgewichtszustand im Gebirge gestört [3]. Mit Verschlechterung des Gebirgszustandes, oft einhergehend mit zunehmender Teufe, steigen die Anforderungen an die Gebirgssicherung sowie der Zeitaufwand dafür. Die Gebirgssicherung wird somit leistungsbestimmend für den Streckenvortrieb und die Produktion. [4, 5] Die anhaltende Weiterentwicklung der Ausbausysteme zur Gebirgssicherung tragen dazu bei, dass tiefe Rohstoffvorkommen sicher und wirtschaftlich gewonnen werden können. [2]

Der Ankerabbau ist eine bedeutende Ausbauart im untertägigen Bergbau [6]. Allerdings gehört die Gebirgssicherung mit Gebirgsankern zu den besonders anspruchsvollen und zeitaufwendigen Tätigkeiten unter Tage [4, 5]. Dabei werden verschiedene Gebirgsanker, teilweise in Kombination mit Ankermörtel, eingesetzt. Ankermörtel dient dazu, einen Gebirgsanker im Ankerbohrloch zu fixieren. Eine gängige Art von Ankermörtel ist Zementmörtel. Jedoch weist dieser eine lange Aushärtezeit auf. Dagegen bietet der Einsatz von Kunstharzen eine signifikante Reduktion der Aushärtezeit, sodass eine unmittelbare Aufnahme von Lasten ermöglicht wird. Pumpfähiges Kunstharz ist weiterhin auch unter schwierigen Gebirgsverhältnissen einsetzbar, wodurch es sich ebenfalls von Zementmörtel, aber auch patroniertem Kunstharz abhebt. [7, 8]

Vollmechanisierte Ankerbohrwagen haben sich zur Gebirgssicherung aufgrund ihrer hohen Leistung und des gebotenen Arbeitsschutzes auf dem Markt durchgesetzt. Dabei sitzt die bedienende Person zwar relativ geschützt in der Kabine, befindet sich jedoch immer noch im Gefahrenbereich, den schwierigen Umgebungsbedingungen exponiert. [5]

Durch eine Erhöhung des Automatisierungsgrades der Ankerbohrwagen können die Arbeitsbedingungen, Qualität der Ankerinstallation und Wirtschaftlichkeit verbessert werden:

- Die Sicherheit wird erhöht, indem die Mitarbeitenden aus dem Gefahrenbereich in Kontrollräume versetzt werden. Gleichzeitig wird der Arbeitskomfort gesteigert, wodurch die Attraktivität der Arbeitsplätze zunimmt. Dadurch kann dem Fachkräftemangel, insbesondere in dünn besiedelten Regionen, entgegengewirkt werden.
- Eine fortschreitende Automatisierung der Ankerbohrwagen kann die Reproduzierbarkeit beim Ankerausbau erhöhen. Bei einer automatisierten Ankerinstallation ist das Ankerbohren und -setzen gleichbleibend. Erfahrung und persönliche Tagesform wirken sich weniger auf Installationsergebnisse aus, sodass geringere Schwankungen in der Installationsqualität auftreten.
- Insbesondere in Hochlohnländern sind Automatisierungslösungen auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten attraktiv. Eine Automatisierung des Ankerbohr- und -setzprozesses ermöglicht eine Überwachung von mehreren Ankerbohrwagen. Auch steht weitere produktive Zeit im Hinblick auf Schichtwechsel, Pausenzeiten und Sprengarbeiten zur Verfügung [4]. Dies ermöglicht weitere Produktivitäts- und Effizienzsteigerungen.

Herausfordernd für eine vollumfängliche Automatisierung des Ankerbohr- und -setzprozesses sind die vielen Teilarbeitsschritte, die während der Ankerinstallation anfallen. Diese Teilarbeitsschritte erfordern individuelle Automatisierungslösungen. Die schwierigen Umgebungsbedingungen verlangen robuste und unempfindliche Systeme und Verfahren. Die unebene Gesteinsoberfläche und die Tatsache, dass die Qualität des vorliegenden Gesteins variiert, setzen situationsadaptive Automatisierungslösungen voraus.

Moderne Ankerbohrwagen verfügen bereits über eine Vielzahl von Assistenzfunktionen zur Steuerung, Überwachung, Protokollierung und Analyse verschiedener Parameter des Ankerbohr- und -setzprozesses. Auch die Planung des Ankerausbaus wird durch geeignete Software unterstützt. Durch eine Automatisierung des Ankermagazinnachladevorgangs entfällt eine gefährliche manuelle Tätigkeit. Zwei- und einschrittige Installationsmethoden führen zu einer signifikanten Verschlangung des Prozesses, wobei pumpfähiges Kunstharz als Ankermörtel eingesetzt wird. [9–12]

Ein Teilarbeitsschritt mit Automatisierungsbedarf ist die Injektion von pumpfähigem Kunstharz zur Ankerverklebung. Bislang existiert noch kein automatisierter Ansatz, bei dem auf die individuellen Bedingungen vor Ort bei der Kunstharzinjektion eingegangen wird. Die automatische Kunstharzinjektion beschränkt sich nach derzeitigem Stand der Technik auf die Einbringung einer festgelegten Menge Kunstharz. Folgende Nachteile können dabei identifiziert werden: Die Einbringung einer festgelegten Kunstharzmenge pro Ankerbohrloch wird den lokal wechselhaften Bedingungen im Gestein nicht gerecht. Durch eine bedarfsgerechte Kunstharzinjektion kann ein Kunstharzüberschuss verhindert werden, während die volle Tragfähigkeit stets

gewährleistet wird. Die Einbringung einer unnötig großen Menge Kunstharz führt zu Verunreinigungen der Strecken und direkten Kosten durch den Materialverbrauch sowie indirekten Kosten durch das Erfordernis kürzerer Nachfüllintervalle, wobei das Nachfüllen produktive Zeit in Anspruch nimmt und damit die Kapazität der Mitarbeitenden bindet.

Aufgrund der beschriebenen Nachteile der automatischen Kunstharzinjektion mit festgelegter Kunstharzmenge wird diese gegenwärtig vorzeitig manuell beendet, sobald ein Kunstharzaustritt aus dem Ankerbohrloch visuell erkennbar ist. Allerdings kann die Sicht durch die Kabine und Maschinenteile eingeschränkt sein. Außerdem muss beim Einbringen der Gebirgsanker in die Firste der Blick für längere Zeit nach oben gerichtet werden, was eine unkomfortable Haltung bedingt. Zudem beträgt der Abstand zwischen der Kabine und dem zu sichernden Bereich mehrere Meter. Erschwerend kommen für eine rechtzeitige Erkennung von Kunstharzaustritt die schlechten Sichtverhältnisse aufgrund von Staub- und Wassereinwirkung sowie mangelnden Lichts hinzu. Die aufgeführten Nachteile haben Einfluss darauf, wann die bedienende Person die Injektion stoppt und demzufolge auch auf den Kunstharzverbrauch. Somit ist die Kunstharzinjektion auch von der Erfahrung und Tagesform der Mitarbeitenden abhängig, was Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Kunstharzinjektion und somit auf das Installationsergebnis hat.

Durch eine automatische bedarfsgerechte Regelung der Kunstharzmenge können Kostenreduktionspotenziale gegenüber der Injektion einer festgelegten Menge realisiert werden. Auch sind kürzere Reaktionszeiten verglichen mit einem manuellen Injektionsstopp möglich, wodurch zusätzlich Kunstharz eingespart werden kann. Zudem ergeben sich bei einer automatischen Kunstharzinjektion mit variabler Menge weitere Potentiale zur Effizienzsteigerung. So kann die bedienende Person während des Injektionsvorgangs anderen produktiven Tätigkeiten nachgehen, die menschlichen Eingriff erfordern.

Die Realisierung einer automatischen bedarfsgerechten Kunstharzinjektion setzt die Erkennung von austretendem Kunstharz voraus. Das Ziel dieser Arbeit ist die Konzeptionierung und Validierung eines sensorbasierten Ansatzes zur Kunstharzerkennung während des Injektionsvorgangs. Bei der Kunstharzinjektion findet durch die Vermischung der Kunstharzkomponenten eine exotherme Reaktion statt, sodass Energie in Form von Wärme freigesetzt wird. Die Infrarotthermographie erfasst emittierte Wärme in Form von elektromagnetischer Strahlung im infraroten (IR) Bereich und stellt diese bildlich dar. Dadurch ist die Infrarotthermographie für die Überwachung und weitere Automatisierung der Kunstharzinjektion eine Sensortechnologie von besonderem Interesse. Mit dem in dieser Arbeit erarbeiteten Ansatz zur Kunstharzerkennung wird ein Beitrag zur weiteren Automatisierung des Ankerbohr- und -setzprozesses geleistet. Die einzelnen Arbeitsschritte zur Zielerreichung werden im Folgenden detailliert erläutert.

Zunächst wird in Kapitel 2 ein Überblick über den aktuellen Automatisierungsstand des Ankerbohr- und -setzprozesses gegeben. Eine Literaturrecherche und Beobachtungen, die während des durch das EIT RawMaterials geförderten Projekts „Automated Bolt Reload“ in Feldversuchen gemacht wurden, dienen als wissenschaftliche Grundlage für dieses Kapitel. Zu Beginn werden für diese Arbeit notwendige Grundlagenkenntnisse über den Ankerausbau und den Aufbau eines Ankerbohrwagens behandelt. Es folgt die Betrachtung aktueller Entwicklungen bei den Installationsmethoden vor dem Hintergrund einer angestrebten Automatisierung. Im Weiteren werden Lösungsansätze zum Einsatz von Sensorsystemen zur Kunstharzerkennung beim Ankerausbau sowie in relevanter Umgebung vorgestellt. Abschließend werden Anforderungskriterien an einen sensorbasierten Ansatz zur Kunstharzerkennung abgeleitet. Als Zwischenergebnis wird eine Anforderungsliste erstellt.

Im nächsten Schritt werden in Kapitel 3 potenzielle Sensortechnologien, die für eine sensorbasierte Kunstharzerkennung in Frage kommen, beschrieben. Eine sensorbasierte Erkennung eines Kunstharzaustritts ist grundsätzlich mittels Bildgebung und/oder Temperaturerfassung möglich. Die Auswahlentscheidung für eine Sensortechnologie erfolgt auf Basis der anschließenden Technologiebewertung, die anhand zuvor definierter Anforderungskriterien durchgeführt wird. Durch den Einsatz der Infrarotthermographie ist es möglich, die Vorteile eines bildgebenden Verfahrens mit denen einer Temperaturerfassung zu kombinieren. Daher wird die Infrarotthermographie als eine besonders geeignete Sensortechnologie zur Kunstharzerkennung angesehen und dementsprechend ausgewählt.

Im Fokus des Kapitel 4 steht die Entwicklung des thermographischen Ansatzes zur Kunstharzerkennung. Zunächst wird der Aufbau des IR-Kamerasystems vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird sowohl die Auswahl der Hardwarekomponenten und eines geeigneten Gehäusekonzepts als auch die Positionswahl sowie die Datenaufnahme beschrieben. Weiterhin wird das Kameraverhalten in Laboruntersuchungen analysiert und Empfehlungen für einen Kamerabetrieb abgeleitet. Die anschließenden Untersuchungen zum Kunstharzaustritt anhand während einer Testmessung generierter Daten dienen als Grundlage für die Entwicklung des Ansatzes. Abschließend wird der entwickelte Algorithmus zur Kunstharzerkennung vorgestellt.

Die Eignung des entwickelten Ansatzes wird in Kapitel 5 mittels Daten aus einer Validierungsmessung geprüft. Im Anschluss wird in Kapitel 6 der entwickelte thermographische Ansatz in Bezug auf die gestellten Anforderungskriterien evaluiert. Dabei werden die erzielten Ergebnisse zur Kunstharzerkennung diskutiert und Optionen für weiterführende Untersuchungen aufgezeigt. Darauf folgt ein Ausblick auf Optimierungs- und Entwicklungspotentiale für zukünftige Arbeiten. Die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit werden in Kapitel 7 zusammengefasst.

2 Automatisierung des Ankerbohr- und -setzprozesses

Zunächst wird eine Einführung über die wesentlichen Grundlagen des Ankerausbaus und den Aufbau von Ankerbohrwagen gegeben. Danach werden aktuelle Entwicklungen bei der Installation von Gebirgsankern betrachtet und aufgezeigt, weshalb die Kunstharzinjektion für eine weitere Automatisierung des Ankerbohr- und -setzprozesses von besonderem Interesse ist. Außerdem wird der Stand der Technik für die Kunstharzerkennung vorgestellt und potenzielle Lösungsansätze betrachtet. Zum Schluss werden Anforderungen an eine sensorbasierte Kunstharzerkennung abgeleitet.

2.1 Grundlagen des Ankerausbaus

Das Auffahren von bergmännischen Hohlräumen hat zur Folge, dass der Gleichgewichtszustand im Gebirge gestört wird. Dies führt zu einer Veränderung des ursprünglichen Spannungszustands des den Streckenmantel umgebenden Gebirges. Überschreiten die durch den Eingriff verursachten Spannungsänderungen die Eigentragsfähigkeit des Gebirges um den Hohlraumbereich, so ist ein Ausbau erforderlich. Der Ausbau dient im Wesentlichen dazu, die Grubenräume offenzuhalten und die Sicherheit der Belegschaft und der Maschinen zu gewährleisten. Die bedeutendste Ausbauart im untertägigen Bergbau ist heutzutage der Anker Ausbau [6]. [3, 8]

Die Wirkungsweise des Ankerausbaus kann anhand verschiedener Modelle beschrieben werden. Nach dem Modell des Aufhängens und Vernagelns werden sich ablösende Gebirgsteile mittels Gebirgsankern im Stoß oder in der Firste an einen angrenzenden tragfähigen Gebirgsbereich befestigt. Nach dem Modell der Balkenbildung verbinden Gebirgsanker mehrere, einzeln unzureichend tragfähige Gesteinsschichten zu einem biegesteifen Gesteinsbalken. Das Modell der Gewölbebildung geht von der Schaffung eines Tragringes aus, indem die Gebirgsanker im Verbund einen Gesteinskörper bilden, der selbsttragend ist. In der Praxis können mehrere Effekte dieser Modellvorstellungen gemeinschaftlich auftreten und sich in ihrer Wirkung verstärken. [8]

Gemäß DIN 21521-1 sind Gebirgsanker in Bohrlöcher eingebaute Bauteile, die Zugkräfte und gegebenenfalls Scherkräfte aufnehmen und dadurch eine Verbindung zwischen Teilen des Gebirges oder von Konstruktionselementen mit dem Gebirge erstellen. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Ausbauanker betrachtet. Ausbauanker werden verwendet, um die

Verbandsfestigkeit des Gebirges aufrechtzuerhalten, einen den Erfordernissen entsprechenden Ausbauwiderstand aufzubauen und einen neuen Gleichgewichtszustand im Streckenmantel zu schaffen. Insbesondere Aufhängeanker für die Verankerung von Lasten sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. [13]

Im Folgenden werden Gebirgsanker vereinfacht als Anker bezeichnet. In Abbildung 2-1 sind die wesentlichen Komponenten eines Ankers abgebildet. Die Ankerplatte wird mit der Anker Mutter und gegebenenfalls mit einer Unterlegscheibe am luftseitigen Ende des Ankerschaftes befestigt. Zusammen bilden sie den Ankerkopf und tragen dazu bei, dass eine Wechselwirkung zwischen dem Anker und dem umgebenden Gebirge hergestellt werden kann. Zusätzlich dient der Ankerkopf zur Verbindung mit weiteren Sicherungsmitteln, wie z. B. Gitterdrahtmatten. Am gebirgsseitigen Ende des Ankerschaftes bzw. der Ankerstange befindet sich der Ankerfuß. Dieser kann mit Bauteilen versehen sein, um den Anker mit der Bohrlochwand zu verbinden, wie dies z. B. bei Spreizankern der Fall ist. Gebräuchlich sind Anker aus Stahl. Diese können mit oder ohne Vorspannung in das Gebirge eingebracht werden. Bei vorgespannten Ankern wird beim Ankersetzen ein Drehmoment auf die Anker Mutter ausgeübt, um die notwendige Vorspannkraft zu erzeugen [14]. [6, 13]

Bei einer systematischen Anordnung werden die Anker nach einem betrieblich vorgegebenen Ankermuster installiert. Nach dem Modell der Gewölbebildung wird davon ausgegangen, dass sich um jede Ankerstange zwischen Ankerkopf und -fuß ein Spannungsfeld in Form eines Doppelkegels bildet (siehe Abbildung 2-1). Damit sich die Einwirkungsbereiche der Anker überschneiden, werden diese in einem definierten Abstand zueinander gesetzt. Gemäß [6] wird bei der Auslegung des Ankerusters üblicherweise ein Ankerabstand von 1 m bis 2,5 m empfohlen, wobei der Reihenabstand dem gewählten Ankerabstand entsprechen sollte. Dadurch wirken die eingebrachten Anker Gebirgsauflockerungen entgegen und unterstützen die Ausbildung eines Tragringes rund um den Hohlraum, um die Tragfähigkeit des Streckenmantels zu erhöhen. Dabei ist auf ein möglichst senkrechtes Einbringen der Anker zu den Gebirgsschichten zu achten. Beeinflusst wird die Tragringdicke von der Überschneidung der Doppelkegel. Wie stark sich die Doppelkegel überschneiden, hängt neben dem Ankerabstand auch von der Ankerlänge ab. Die für diesen Einsatzzweck verwendeten Anker sind in der Regel kurz. In [6] werden dafür Ankerlängen von 2 m bis 3 m angegeben. [5, 6, 8]

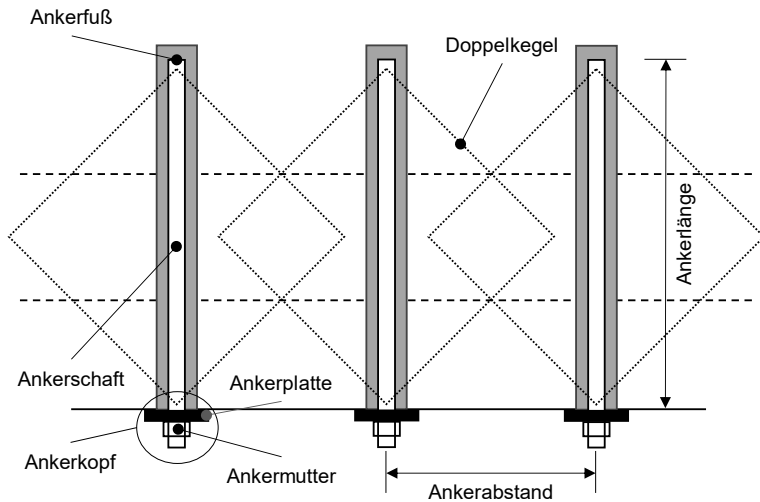


Abbildung 2-1: Installation von Ankern, in Anlehnung an [6]

2.1.1 Einteilung von Ankern anhand des Verbundelements gemäß DIN 21521-1

Damit ein Anker seine Funktion erfüllen kann, muss dieser mit dem Gebirge fest verbunden sein. Die Anker können nach dem Verbundelement bzw. dem Verankerungsmechanismus eingeteilt werden. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Einteilung der Anker gemäß DIN 21521-1 nach dem Verbundelement in Spreizanker, Reibrohranker und Mörtelanker. Dabei sei angemerkt, dass eine Norm nur den zum Zeitpunkt der Veröffentlichung bekannten Stand der Technik abbildet. Durch technischen Fortschritt können sich Benennungen ändern oder präzisiert werden. Weiterhin sind auch Kombinationen verschiedener Verankerungsmechanismen möglich. Ein Beispiel für eine solche Kombination ist ein Spreizanker, der im Bohrlochtiefsten in Kunstharz eingebettet wird [8].

Spreizanker

Der schematische Aufbau eines Spreizankers ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Die Verankerung eines Spreizankers erfolgt, indem das am Ankerfuß angebrachte Spreizelement gegen die Bohrlochwand im Bohrlochtiefsten verspannt wird [13]. Bei der Installation muss ein ausreichendes Drehmoment aufgebracht werden, um eine optimale Vorspannung zu gewährleisten. Die Konstruktionsformen von Spreizankern sind vielfältig. Zu den Ankern mit Spreizelementen zählen z. B. Spreizhülsenanker, Spreizkeilanker, Keilhülsenanker und Schlitzkeilanker. Vorteilhaft sind der einfache Einbau mit kurzen Installationszeiten und die sofortige volle Tragfähigkeit. Dadurch, dass die Ankerstange Spiel hat, können zudem die einwirkenden Kräfte auf die gesamte Ankerstange verteilt werden. Auch sind Spreizanker kostengünstig. Zu beachten

ist, dass sich Bewegungen im Streckenmantel, z. B. verursacht durch Sprengerschütterungen, negativ auf die Verankerung auswirken können. Außerdem ist eine ausreichende Gesteinsfestigkeit im Verankerungsbereich erforderlich, damit der Spreizmechanismus wirken kann. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Spreizankern in Gebirge mit vielen Klüften oder geringer Festigkeit eingeschränkt. Zudem sind Spreizanker anfällig für Korrosion. [5, 6, 8, 15]

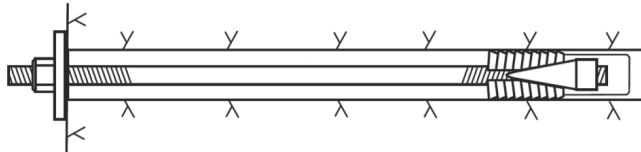


Abbildung 2-2: Spreizanker [6]

Reibrohranker

Der Verbund zwischen Anker und Gebirge kann auf zwei Arten erzeugt werden. Bei dem Faltrohranker wird ein zusammengefaltetes Rohr im Ankerbohrloch mittels Hochdruckwasser aufgefaltet und gegen die Bohrlochwand gedrückt. In Abbildung 2-3 ist ein Schlitzrohranker illustriert. Dieser besteht aus einem längsgeschlitzten Rohr, das in ein unterdimensioniertes Ankerbohrloch eingetrieben wird. Der Ankerfuß ist zum vereinfachten Eintreiben konisch geformt. Aufgrund des komprimierten Querschnitts entsteht eine radiale Kraftwirkung über die gesamte Ankerlänge. Dabei ist die Maßhaltigkeit des Bohrlochdurchmessers entscheidend für die Tragfähigkeit des Schlitzrohrankers. Reibrohranker haben kurze Einbauzeiten, sind einfach zu installieren und sofort tragfähig. Aufgrund ihrer Anfälligkeit für Korrosion werden Reibrohranker jedoch überwiegend für die temporäre Gebirgssicherung eingesetzt. [5, 8, 15]

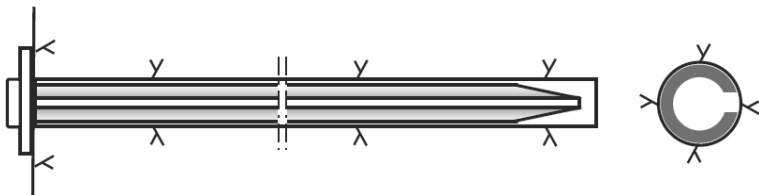


Abbildung 2-3: Reibrohranker als Schlitzrohranker [6]

Mörtelanker

In Abbildung 2-4 ist schematisch ein Mörtelanker dargestellt. Die Verbundwirkung zwischen Anker und Gebirge wird über das Einbringen eines Ankermörtels hergestellt. Dafür wird Zementmörtel oder Kunstharz verwendet, die in pumpfähiger oder patronierter Form verfügbar sind. Im Kontext der Installation von Ankern wird auch Kunstharz als Ankermörtel bezeichnet.

Für Kunstharzmörtelanker ist auch die Bezeichnung Klebanker gebräuchlich. Der Ankermörtel wird entweder vor oder nach dem Anker ins Ankerbohrloch eingebracht. Letzteres ist nur bei einem pumpfähigen Ankermörtel möglich. Das Einbringen des Ankermörtels erfolgt über die gesamte Bohrlochlänge oder nur im Endbereich. Die Haftung des Ankers im Bohrloch beruht überwiegend auf Formschluss, indem der Ankermörtel in die Profilierung der Ankerstange und Unebenheiten der Bohrlochwand eindringt. Erst wenn der Ankermörtel ausreichend ausgehärtet ist, ist die Tragfähigkeit des Ankers gegeben. Daher ist ein zuverlässiges und schnelles Aushärten erforderlich. Die Fließ- und die Aushärtezeit des Ankermörtels sind auf die Installationsmethode und die Gegebenheiten vor Ort abzustimmen bzw. der passende Ankermörtel zu wählen. Der Anker kann mit oder ohne Vorspannung eingebracht werden. [5, 8, 13]

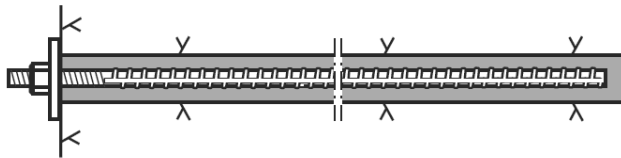


Abbildung 2-4: Mörtelanker [6]

Im Folgenden wird auf die beiden Ankermörtel, Zementmörtel und Kunstharz, detaillierter eingegangen.

2.1.2 Einsatz von Zementmörtel als Ankermörtel

Für die Installation von Ankern wird Zementmörtel am längsten als Ankermörtel eingesetzt. Hauptbestandteile sind Zement, feinkörniger Sand und Wasser. Durch die Zugabe weiterer Zuschlagsstoffe können Eigenschaften, wie z. B. die Quelfähigkeit des Zementmörtels, angepasst werden. Nachteilig beim Einsatz von Zementmörtel sind die langen Aushärtezeiten von mehreren Stunden. Dadurch ist das Vorspannen der Anker in der Regel erst nach dem Aushärten möglich [6]. Ansonsten besteht die Gefahr, dass der Verbund zwischen Anker und Zementmörtel beschädigt wird [6]. Außerdem können sich in der Nähe gelegene Sprengarbeiten während des Aushärteprozesses negativ auf die Wirksamkeit der Verankerung auswirken. Vorteilhaft ist, dass Zementmörtel kostengünstig ist [7, 15]. [8]

Zementmörtel kann lose oder patroniert eingebracht werden. Die Zementmörtelpatronen können Wasser enthalten, anderenfalls muss zusätzlich Wasser zugeführt werden. [8] Generell ist der Einsatz von patronierten Zementmörtel unter Tage nicht weit verbreitet [15]. Auf die einzelnen Schritte der Ankerinstallation mit losem Zementmörtel wird in Kapitel 2.3.1 detailliert eingegangen.

2.1.3 Einsatz von Kunstharz als Ankermörtel

Für bergmännische Anwendungen sind verschiedene Kunstharzprodukte auf dem Markt verfügbar. Für die Installation von Ankern unter Tage werden primär Polyesterharze, Polyurethanharze und Silikatharze eingesetzt. Die Kunstharzprodukte bestehen in der Regel aus zwei Komponenten: einem Harz und einem Härter. Durch die kurzen Aushärtezeiten von einigen Sekunden bis wenigen Minuten kann eine schnelle Tragfähigkeit erreicht werden. Die Fließ- und Aushärtezeiten von Kunstharzprodukten sind für den jeweiligen Anwendungsfall einstellbar. [16, 17]

Gebräuchlich sind Kunstharzpatronen mit zwei getrennten Bereichen für das Harz und den Härter. Sie werden mit unterschiedlichen Aushärtezeiten, Längen und Durchmessern angeboten. Ein wesentliches Auswahlkriterium ist das Durchmesser Verhältnis von Anker zu Ankerbohrloch, denn der Ringspalt muss eine optimale Größe haben, damit die Vermischung der Komponenten möglich ist. Die beiden Komponenten werden im Ankerbohrloch gemischt, indem die rotierende Ankerstange die Patrone zerreißt. Um eine vollständige Vermischung zu erzielen, muss die erforderliche Drehzeit (engl.: spin time) eingehalten werden. [17, 18]

Im Gegensatz zu Kunstharzpatronen können pumpfähige Kunstharzprodukte unabhängig von der vorherrschenden Bohrlochsituation ein vollständiges Umhüllen des Ankers gewährleisten. Dafür muss das Kunstharz einerseits ausreichend lange pumpfähig sein und andererseits schnell genug aushärten und dabei eine hinreichende Festigkeit aufweisen, sodass der Anker unmittelbar nach der Installation belastbar ist. Die Bestrebungen den Ankerbohr- und -setzprozess zu automatisieren, führen auch zu neuen Anforderungen an den Ankermörtel. Auf dem Markt werden speziell für diese Anwendung entwickelte pumpfähige Silikatharzsysteme angeboten. [16, 19]

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf pumpfähigen Kunstharzsystemen auf der Basis von Silikatharz. Silikatharze sind Zweikomponenten-Kunstharze. Sie können grundsätzlich schäumend oder nicht schäumend sein. Die Schaumbildung wird über die Rezeptur eingestellt. Silikatharze sind unempfindlich gegenüber Wasser. Ein Auftreten von Wasser führt weder zu einer Entmischung oder Verdünnung des Reaktionsgemisches noch zu einer Beeinflussung der Schaumbildung. Dadurch ist eine gute Haftung auch auf feuchten Oberflächen gegeben. Im Gegensatz dazu neigen z. B. Polyurethanharze bei Auftreten von Wasser zum Aufschäumen, wodurch sich ihre mechanische Festigkeit verringert. Diese Eigenschaft ist nachteilig beim Einsatz in wasserführenden Gebirgsformationen. Ein weiterer Vorteil von Silikatharzen ist die schwere Entflammbarkeit mit hohem Flammpunkt der Komponenten [19]. [5, 20]

Temperaturentwicklung des Kunstharzes beim Aushärten

Durch das Mischen der beiden Kunstharzkomponenten wird eine chemische Reaktion ausgelöst, wodurch das Kunstharzgemisch aushärtet und der Anker im Ankerbohrloch fixiert wird. Die Aushärtereaktion verläuft exotherm, sodass Energie in Form von Wärme freigesetzt wird und die Temperatur des Kunstharzes ansteigt. [19–21] Um zu ermitteln, ob dadurch eine signifikante Temperatursteigerung eindeutig erfasst werden kann, wurde eine Untersuchung zur Temperaturentwicklung des Kunstharzes durchgeführt.

Dafür wurden 0,79 l Kunstharz aus der Injektionseinheit auf das Gestein abgelassen, das sich anschließend auf der Oberfläche ausbreitete. Unmittelbar danach wurde mit einem Pyrometer die Kunstharztemperatur für ca. 4 min erfasst. Für die Messung der absoluten Temperatur wurde das Pyrometer HP-1800C eingesetzt. Dieses arbeitet in einem Temperaturbereich von -50 °C bis 1800 °C [22]. Die Genauigkeit beträgt ± 2 °C in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 100 °C [22]. Das Pyrometer errechnet eine aktuelle Oberflächentemperatur basierend auf der erfassten Wärmestrahlung der gemessenen Fläche (Messfleck) und dem eingestellten Emissionsgrad (Gerätevoreinstellung: 0,95) [22]. Das Verhältnis zwischen Messfleckdurchmesser und Abstand ist 1:50 [22]. Der Abstand zwischen Pyrometer und Messobjekt betrug ca. 2 m. Daraus resultiert ein Messfleck-Durchmesser von ca. 40 mm. Durch einen projizierten Laserstrahl war es möglich, die Position des Messflecks visuell zu erkennen. Das Pyrometer wurde über den Messbereich geschwenkt, um die lokalen Temperatur-Maxima zu erfassen. Die Daten vom Pyrometer wurden über eine Videoaufnahme abgelesen. Die Ablesung erfolgte alle 5 s.

In Abbildung 2-5 ist der zeitliche Verlauf der Kunstharztemperatur dargestellt. Zu Messbeginn liegt eine Temperatur von ca. 21 °C vor. Innerhalb von 10 s erhöht sich die Temperatur auf ca. 45 °C und nach weiteren 10 s auf über 85 °C. Die hohen Werte (über 80 °C) werden wenige Sekunden gehalten und fallen dann ab, wobei die Abnahme der Temperatur mit geringerer Geschwindigkeit verläuft als die Zunahme. Die Ausreißer im Temperaturverlauf lassen sich dadurch erklären, dass kurzzeitig das Pyrometer auch weiter abgekühltes Material oder Gestein miterfasst haben könnte. Während des Versuches wurde am Kunstharz ein Höchstwert von 88,7 °C gemessen.

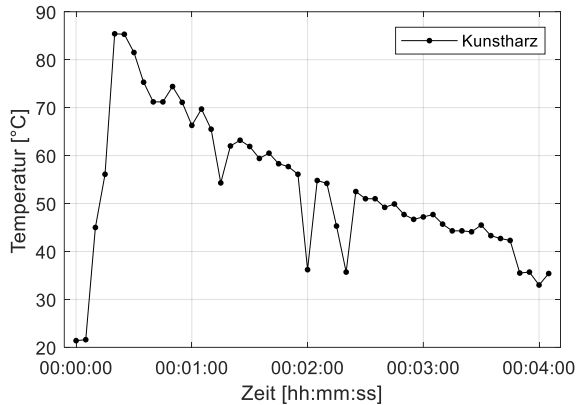


Abbildung 2-5: Zeitlicher Verlauf der Kunstharztemperatur

Zum Zeitpunkt der Untersuchung betrug die Temperatur in den Kunstharzbehältern 18,7 °C für Komponente A und 18,6 °C für Komponente B. Die Umgebungstemperatur lag zwischen 15,1 °C und 16,2 °C für diesen Streckenabschnitt während der Schicht. Auf der gleichen Stoßseite wurden mit demselben Pyrometer an der Gesteinsoberfläche Temperaturen zwischen 15,2 °C und 18,7 °C gemessen. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass bei den gegebenen Umgebungsbedingungen der Untersuchung eine starke Temperaturerhöhung des Kunstharzes durch die exotherme Reaktion stattfand. Die Kunstharztemperatur ist während des Aushärtens deutlich höher als die Umgebungstemperatur und die Temperatur der Gesteinsoberfläche. Die Untersuchung zeigt zudem, dass die Kunstharztemperatur in den ersten Minuten hoch bleibt. Die Werte liegen nach 1 min bei über 65 °C und nach 3 min bei über 45 °C. Die grundsätzliche Eignung für eine sensorbasierte Erkennung von Kunstharzaustritt auf Grundlage einer Temperaturerhöhung bzw. eines Temperaturunterschieds ist somit gegeben.

2.2 Aufbau eines Ankerbohrwagens

Bevorzugt werden vollmechanisierte Ankerbohrwagen zur Ankerinstallation verwendet. Der Einsatz von vollmechanisierten Ankerbohrwagen ermöglicht ein maschinelles Ankerbohren und -setzen. Dabei befindet sich die bedienende Person geschützt in einer Kabine einige Meter vom ungesicherten Bereich entfernt. Dagegen wird bei der manuellen Installation das Ankerbohren und -setzen mit handgeführten Geräten ausgeführt und weist einen erhöhten Zeitbedarf auf. Insbesondere in Hochlohnländern beschränkt sich die manuelle Installation auf einzelne wenige Anker. Bei der halbmechanisierten Installation erfolgt zwar das Ankerbohren maschinell, jedoch wird das Ankersetzen manuell ausgeführt. In beiden Fällen befindet sich

die bedienende Person im ungesicherten Gefahrenbereich. Zudem wird durch die vollmechanisierten Installation eine konstante Qualität ermöglicht, die in der Regel höher ist als bei der manuellen und halbmechanisierten Installation [11]. [5]

In Abbildung 2-6 ist beispielhaft ein vollmechanisierter Ankerbohrwagen der Firma Epiroc abgebildet. Vollmechanisierte Ankerbohrwagen bestehen gewöhnlich aus einem Trägerfahrzeug mit Diesel- oder Batteriebetrieb, auf welchem sich eine Kabine für die bedienende Person befindet. Wie in Abbildung 2-6 zu sehen ist, befindet sich im vorderen Bereich des Ankerbohrwagens ein Bohrarm (gelb) zum Ankerbohren und -setzen. Der hydraulisch betätigte Bohrarm trägt eine Bohrlafette und ermöglicht Schwenk- und Drehbewegungen. Dadurch können Anker im definierten Winkel oben in die Firste und seitlich in die Stöße eingebracht werden. Seitlich an der Bohrlafette ist ein rotationsfähiges Magazin montiert, das mehrere Anker enthält. Ein Gestell für die Lagerung einer größeren Anzahl an Ankern befindet sich am Trägerfahrzeug. Optional verfügen Ankerbohrwagen über einen Gitterarm (grau) zur Anbringung von Gitterdrahtmatten. Ankerbohrwagen sind so konzipiert, dass sie möglichst flexibel einsetzbar sind. Die Installation verschiedener Ankertypen und Ankerlängen mit demselben Ankerbohrwagen ist möglich. Auch werden vollmechanisierte Ankerbohrwagen für unterschiedliche Streckenhöhen angeboten. Beispielsweise bietet die Firma Epiroc Ankerbohrwagen für Streckenhöhen ab 1,8 m bis 13 m an. [5, 11, 23, 24]



Abbildung 2-6: Ankerbohrwagen Boltec M10 [25]

In Abbildung 2-7 ist eine Bohrlafette mit den wesentlichen Komponenten schematisch dargestellt. Der Vorschub des Bohrhammers erfolgt anhand eines Zugseils oder -kette, womit die für das Bohren notwendige Andruckkraft erzeugt wird. Die Übertragung der Schlagenergie und

des Drehmoments vom Bohrhämmer auf das Bohrgestänge mit Bohrkrone erfolgt über das Einsteckende, auch als Shank Adapter bezeichnet [26]. Als Bohrspülung wird überwiegend Wasser eingesetzt. Für bestimmte Arbeitsumgebungen wird auch Druckluft als Spülmedium verwendet. Zum Abtransport des Bohrkleins wird Spülwasser über das hohle Bohrgestänge zugeführt, das anschließend an der Bohrkrone austritt. Das Bohrklein wird zusammen mit dem Spülwasser zwischen Bohrlochwand und Bohrgestänge ausgetragen. Nach der Herstellung des Bohrlochs wird das Bohrgestänge zur Seite bewegt, um die nachfolgenden Schritte, wie das Injizieren des Ankermörtels und das Einbringen des Ankers, nicht zu behindern. [5]

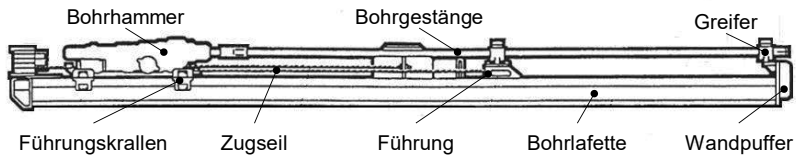


Abbildung 2-7: Bohrlafette mit wesentlichen Komponenten, in Anlehnung an [5]

Moderne Ankerbohrwagen sind mit einer Vielzahl an Assistenzfunktionen ausgestattet. Ein computergestütztes Steuersystem mit Bedien- und Anzeigeeinheit dient der Steuerung und Überwachung der Maschine. Verschiedene Parameter des Ankerbohr- und -setzprozesses können entsprechend der vorliegenden Gebirgssituation eingestellt und Ereignisse sowie Fehler für spätere Analysen protokolliert werden. Durch den Einsatz von Planungssoftware, wie der Bolt Plan Navigation Software der Firma Epiroc, wird die Ankerinstallation geplant, durchgeführt und protokolliert. Dabei werden z. B. die Ankerposition, der Ankermörtelverbrauch sowie weitere relevante Informationen des installierten Ankers gespeichert. Bereits installierte Anker können mit ihrem Abstand zueinander auf einem Display angezeigt werden. Je nachdem welche Art von Ankermörtel eingesetzt wird kann ein Ankerbohrwagen mit einem Injektionssystem ausgestattet sein. [11, 12, 27]

Eine bis vor kurzem ungelöste Herausforderung betrifft das manuelle Nachladen des vorderen Magazins, da hierfür die Kabine verlassen und der ungesicherte Bereich betreten werden muss. Allerdings existiert zum Zeitpunkt der Arbeit bereits ein Ankerbohrwagen der Firma Epiroc mit einem automatischen Nachladesystem, sodass das Gefährdungspotenzial für die bedienende Person signifikant gesenkt werden kann. Weitere Entwicklungen betreffen die Verschlinkung des mehrschrittigen Ankerbohr- und -setzprozesses. Diese werden im folgenden Unterkapitel beschrieben. [4, 10]

2.3 Aktuelle Entwicklungen bei der Installation von Ankern mittels vollmechanisierter Ankerbohrwagen und die Bedeutung von pumpfähigem Kunstharz

Nach wie vor ist die Installation von Ankern in Kombination mit Zementmörtel oder Kunstharzpatronen, auch als dreischrittige Installationsmethoden bezeichnet, weitverbreitet. Aufgrund konstruktiver Einschränkungen, ist hierbei jedoch die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass es während der Installation zu Unterbrechungen kommt oder ein menschlicher Eingriff erforderlich wird. So hat bspw. der schwedische Bergwerksbetreiber LKAB eine Leistungsabnahme seiner auf die Ankerinstallation mit Zementmörtel spezialisierten Ankerbohrwagen festgestellt. Diese ging mit der Verlagerung der Arbeiten in größeren Teufen einher, wobei schwierige Gebirgsverhältnisse auftraten. [7]

In den letzten Jahren wurden Bestrebungen unternommen den Ankerbohr- und -setzprozess zu vereinfachen. Durch die Eliminierung von Arbeitsschritten vor, während und nach dem Ankerbohren und -setzen können die Installationszeit verkürzt und mehr Anker pro Schicht eingebracht werden. Eine schlanke Gestaltung der Installation vereinfacht zudem die weitere Automatisierung des Ankerbohr- und -setzprozesses. Aus diesen Bestrebungen resultieren neuartige Installationsmethoden, die gemäß [23] auch als High Performance-Methoden bezeichnet werden. Diese basieren auf dem Einsatz eines pumpfähigen Kunstharzsystems, eingesetzt in Kombination mit Hohlankern oder selbstbohrenden Injektionsankern, kurz als SDA-Anker (SDA, engl.: self drilling anchor) bezeichnet. [7, 9, 23]

Im Folgenden werden zuerst die dreischrittigen Installationsmethoden unter Einsatz von Zementmörtel oder Kunstharzpatronen beschrieben. Die vielen Einschränkungen, die bei den dreischrittigen Installationsmethoden auftreten können, werden ebenfalls aufgeführt. Anschließend werden zwei High Performance-Methoden (zwei- und einschrittige Installationsmethoden) erläutert.

2.3.1 Dreischrittige Installationsmethoden

Bei der Installation der Anker mit Zementmörtel wird dieser zu Beginn der Schicht gemischt. Dieser Vorgang dauert mehrere Minuten. Währenddessen lädt die bedienende Person das Magazin mit Ankern. Erst nach Fertigstellung des Zementmörtels wird mit der Installation begonnen. Im ersten Schritt wird mittels des Bohrgestänges das Ankerbohrloch erzeugt. Danach wird im zweiten Schritt der Injektionsschlauch bis ins Bohrlochtiefste eingeführt und das Ankerbohrloch automatisch oder manuell mit Zementmörtel verfüllt. Daraufaufgehend wird im dritten Schritt der Anker hineingeschoben, wodurch der Zementmörtel verdrängt und der Anker umschlossen wird. Damit ist Installation abgeschlossen und der Bohrmantel wird an die nächste Stelle positioniert. Der Ankerbohr- und -setzprozess wird wiederholt, bis alle Anker aus dem

Magazin installiert sind. Anschließend wird das Magazin nachgeladen und erforderlichenfalls erneut Zementmörtel gemischt. [7, 23]

Beim Einsatz von Zementmörtel ergeben sich folgende Einschränkungen [7]:

1. Das Ankerbohrloch und der Injektionsschlauch oder der Anker können zueinander ungenügend ausgerichtet sein. Dann ist für das Einführen des Injektionsschlauchs oder des Ankers eine manuelle Anpassung der Bohrarmposition notwendig. Dabei besteht Kollisionsgefahr mit der Gesteinsoberfläche, wodurch Maschinenkomponenten beschädigt werden können. [23]
2. Zementmörtel hat lange Aushärtezeiten von mehreren Stunden.
3. Gesteinsstücke können das vollständige Einführen des Injektionsschlauchs ins Ankerbohrloch blockieren. Dies stellt häufig ein Problem bei schlechten Gebirgsverhältnissen dar. Das lose Gestein muss zuerst entfernt werden, bevor der Injektionsschlauch erneut eingeführt werden kann. Wenn das erneute Einführen scheitert, muss das Ankerbohrloch aufgegeben und ein neues gebohrt werden.
4. Die Menge an eingebrachten Zementmörtel ist nachträglich nicht anpassbar, da die Injektion vor dem Ankersetzen erfolgt. Das Volumen des Ankerbohrlochs kann bspw. durch Risse, Hohlräume, Überbohrungen, etc. vergrößert sein. Dies kann zu einer unvollständigen Benetzung des Ankers beim Installationsvorgang führen. Dadurch besteht die Gefahr einer verminderten Tragfähigkeit des Ankers und dass Korrosion auftritt.
5. Bei gleichzeitiger Anbringung von Gitterdrahtmatten kann der Injektionsschlauch an diesen hängen bleiben, wodurch produktive Zeit verloren geht.
6. Die Handhabung von Zementmörtel ist aufwendig. Eine regelmäßige Reinigung des Zementmischers und des Pumpsystems ist erforderlich, um Blockaden in den Schläuchen sowie das Anhaften von Zementmörtel an Bohrarm und -lafette zu vermeiden.

Insbesondere die aufwendige Handhabung des Zementmörtels hat großen Einfluss auf die Produktivität der Ankerinstallation [28]. Bei Stillstandzeiten von mehr als einer halben Stunde muss das Zementsystem gespült und der Bohrarm gereinigt werden. Während einer regulären Schicht geschieht dies vor der Pausenzeit und nach dem Schichtende. Muss der Ankerbohrwagen an einen anderen Standort versetzt werden, ist ebenfalls eine Reinigung erforderlich. Für eine Reinigung kann eine Dauer von ca. 25 min angenommen werden. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass eine erneute Aufnahme der Installationsarbeiten nach einer Unterbrechung nur mit ausreichendem zeitlichen Abstand (> 60 min) vor der Pausenzeit oder dem Schichtwechsel erfolgt. [23]

Bei der Installation von Ankern mit patentiertem Kunstharz entfallen das Mischen des Zementmörtels und die Reinigungsarbeiten. Dadurch ist auch noch kurz vor dem Schichtende eine

erneute Aufnahme der Installationsarbeiten sinnvoll [28]. Zu Beginn der Schicht werden Kunstharzpatronen aufgefüllt und Anker in das Magazin geladen. Nach Herstellung des Ankerbohrlochs, im ersten Schritt, wird im zweiten Schritt mit Hilfe eines Patronenschlauchs eine definierte Menge Kunstharzpatronen eingeführt. Im dritten Schritt wird der Anker rotierend in das Bohrloch eingebracht. Dabei werden die Kunstharzpatronen zerrissen und die Kunstharzkomponenten vermischt. Nach einer kurzen Haltezeit kann die Ankermutter angezogen werden, um den Anker vorzuspannen. [23]

Wie bei der Ankerinstallation mit Zementmörtel, ergeben sich beim Einsatz von patroniertem Kunstharz die Einschränkung 1 und 3 bezüglich der Ausrichtung und der Blockade des Ankerbohrlochs durch loses Gestein. Darüber hinaus kann eine ungenügende Durchmischung der Kunstharzkomponenten in einer fehlerhaften Installation der Anker resultieren. Eine weitere potenzielle Fehlerquelle ist eine zu gering bemessene Menge an Kunstharzpatronen. [23] Dieses Problem kann bei schlechten Gebirgsverhältnissen auftreten, da sie zu einer Vergrößerung des Bohrlochs führen können. Da allerdings die Kunstharzpatronen vor dem Anker eingebracht werden, ist eine nachträgliche Anpassung nicht möglich, sodass es auch zur Einschränkung 4 kommen kann. Wenn zudem Gitterdrahtmatten angebracht werden, ergibt sich auch die Einschränkung 5.

2.3.2 Zwei- und einschrittige Installationsmethoden

Bei den zwei- und einschrittigen Installationsmethoden entfällt mindestens ein Arbeitsschritt, da der Injektions- bzw. Patronenschlauch durch einen Hohlanker oder einen SDA-Anker ersetzt wird. Als Ankermörtel wird pumpfähiges Kunstharz eingesetzt. Dadurch entfallen die Reinigungsarbeiten bzw. das Nachfüllen der Kunstharzpatronen. Dabei ist zu beachten, dass Hohlanker, insbesondere SDA-Anker, kostenintensiver als gewöhnliche Mörtelanker sind. Jedoch können die Mehrkosten durch eine höhere Produktivität kompensiert werden. [23]

Bei der zweischrittigen Installationsmethode erfolgt das Bohren des Ankerbohrlochs über das Bohrgestänge. Danach wird ein Hohlanker eingesetzt. Um Kunstharz über die hohle Ankerstange zu injizieren, wird die Injektionseinheit an den Anker gekoppelt. Abschließend wird der Bereich zwischen Bohrlochwand und Anker vom Bohrlochtiefsten beginnend gefüllt. [23]

Bei der einschrittigen Installationsmethode findet das Ankerbohren und -setzen kombiniert statt. Dafür werden SDA-Anker eingesetzt. Ein SDA-Anker ist am Ankerfuß mit einer Bohrkronen ausgestattet, die im Ankerbohrloch verbleibt. Im Inneren ist der SDA-Anker hohl, sodass dieser während des Bohrens als Spülkanal und danach als Injektionskanal für das Kunstharz fungiert. Ein Vorteil der SDA-Anker ist eine kürzere Installationszeit, insbesondere bei schlechten Gebirgsverhältnissen, da weniger Störungen auftreten können. Beispielsweise können kollabierende Bohrlöcher ausgeschlossen werden, weil der SDA-Anker zu keinem Zeitpunkt das Ankerbohrloch wieder verlässt. [7, 23]

Der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Anwendungsfall ist der Ankerausbau mit SDA-Ankern und pumpfähigem Zweikomponenten-Kunstharz. In Abbildung 2-8 ist diese einschrittige Installationsmethode veranschaulicht. Im Folgenden werden die Komponenten und die Funktionsweise des Pump- und Injektionssystems sowie die Vorgehensweise beim Einbringen des Kunstharzes beschrieben. Die zwei Komponenten des Kunstharzes befinden sich auf dem Ankerbohrwagen in separaten Behältern. Die Behälter werden zum Zeitpunkt dieser Arbeit weder gekühlt noch geheizt. Das heißt, dass die Temperatur der Kunstharzkomponenten im Ruhezustand in etwa der Umgebungstemperatur entspricht. Mit dem Fortschreiten der Schicht kann die Temperatur durch die Abwärme des Ankerbohrwagens ansteigen. Der bedienenden Person werden über einen Monitor wesentliche Parameter des Pump- und Injektionssystems angezeigt. Dazu gehören z. B. Pumpendruck, Durchflussmenge und Kunstharztemperaturen in den Behältern. Bei Überschreitung definierter Parameterwerte, wie z. B. des Pumpendrucks, wird die Injektion aus Sicherheitsgründen automatisch abgeschaltet [7]. Die Kunstharzkomponenten werden aus den Behältern mittels einer Zweikomponentenpumpe in einem vordefinierten Volumenverhältnis getrennt voneinander über Injektionsschläuche gefördert und in einem Statikmischer unmittelbar vor der Injektion gemischt [29]. Die Injektion selbst erfolgt durch die hohle Ankerstange vom Bohrlochtiefsten aus [7].

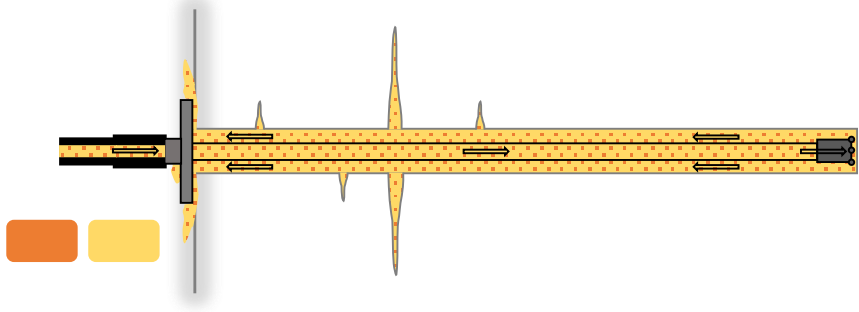


Abbildung 2-8: Einschrittige Installationsmethode mit SDA-Anker und Zweikomponenten-Kunstharz, in Anlehnung an [7, 16, 30]

Die bedienende Person entscheidet anhand zweier Kriterien, wann die Kunstharzinjektion beendet wird. Das erste Kriterium ist austretendes Kunstharz. Sobald Kunstharz im Bereich der Ankerplatte visuell erkannt wird, wird die Injektion gestoppt, vorausgesetzt eine ausreichende Kunstharzmenge wurde injiziert. Die Mindestmenge ist von den Gebirgsverhältnissen abhängig und liegt im Ermessen der bedienenden Person. Das zweite Kriterium wird herangezogen, wenn kein Kunstharzaustritt festgestellt werden kann. Dies ist in der Regel auf Risse und Hohlräume im Gestein zurückzuführen, die größere Mengen Kunstharz aufnehmen können. In diesem Fall wird die Injektion spätestens dann automatisch beendet, wenn eine festgelegte

Höchstmenge an Kunstharz eingebracht ist. Die erforderliche Kunstharzmenge wird in der Regel anhand vorangegangener Zugversuche an im Betrieb installierten Ankern ermittelt.

Beobachtungen unter Tage zeigten, dass das injizierte Kunstharz an mehreren Stellen austreten kann:

- um den äußeren Rand der Ankerplatte
- zwischen dem inneren Rand der Ankerplatte und -mutter
- aus der hohlen Ankerstange (bei Defekt oder nach Abkopplung)

Während des Injektionsvorgangs ist ein Austritt aus der Ankerstange nur infolge einer schlechten Fixierung oder eines Defekts möglich, daher sind nur die beiden erstgenannten Möglichkeiten relevant für diese Arbeit. An dieser Stelle sei angemerkt, dass ein alleiniger Austritt von Kunstharz zwischen dem inneren Rand der Ankerplatte und -mutter ebenfalls ein Indiz für eine unzureichende Fixierung oder einen Defekt sein kann. Dies trifft insbesondere zu, wenn der Austritt zu Beginn der Injektion erfolgt.

Unmittelbar nach dem Injektionsstopp wird automatisch eine feste Menge an Schmierfett durch die Injektionseinheit gepumpt, damit sich kein Kunstharz im Inneren festsetzen kann. Mindestens solange das Schmierfett durch die Injektionseinheit gepumpt wird, ist diese noch an den Anker gekoppelt. Gleichzeitig soll das Festhalten sicherstellen, dass das Kunstharz ausreichend ausgehärtet ist, sodass der Anker im Ankerbohrloch nach dem Loslassen nicht verrutscht. Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, erfolgt das Aushärten des Kunstharzes dadurch, dass die beiden Kunstharzkomponenten exotherm miteinander reagieren.

2.3.3 Stand der Technik zur automatischen bedarfsgerechten Kunstharzinjektion

Für eine Automatisierung des Ankerbohr- und -setzprozesses ist es erforderlich, dass die Installation eine geringe Fehleranfälligkeit aufweist. Dies wird am besten durch die einschrittige Installationsmethode gewährleistet, indem pumpfähiges Kunstharz und SDA-Anker eingesetzt werden. Nach derzeitigem Stand der Technik beschränkt sich die Automatisierung der Kunstharzinjektion auf die Einbringung einer festgelegten Menge Kunstharz. Sobald ein Kunstharzaustritt visuell erkennbar ist, wird der Injektionsvorgang durch die bedienende Person manuell beendet. Hier besteht der Bedarf an einer automatischen bedarfsgerechten Kunstharzinjektion.

Wie in Kapitel 1 erläutert, bietet eine automatische Kunstharzinjektion mit variabler Menge mehrere Vorteile. Grundvoraussetzung dafür ist einen Kunstharzaustritt erkennen zu können. Daher werden im Folgenden potenzielle Lösungsansätze für eine Kunstharzerkennung betrachtet.

In dem in [31] beschriebenen Ansatz wird zur Überwachung des Injektionsvorgangs ein Injektionsanker mit einem vorderen Sichtkontrollstrumpf vorgestellt. Nachdem das Ankerbohrloch

mit einer Injektionsmasse ausgefüllt ist, fließt diese in einen elastischen und luftdurchlässigen Sichtkontrollstrumpf. Dadurch nimmt das Volumen des Sichtkontrollstrumpfs sichtbar zu und seine Außenseite wird feucht. Darüber können Rückschlüsse getroffen werden, ob die Injektionsmasse im Inneren ausreichend ist. Die Injektion kann bei einem ausreichenden Füllgrad des Sichtkontrollstrumpfs beendet werden. Dieser Ansatz stellt eine Lösungsvariante dar, wie eine visuelle Überprüfung für die bedienende Person erleichtert werden kann, ersetzt die menschliche Sichtkontrolle jedoch nicht.

In [32] wird ein Epoxidharzsystem vorgestellt, das mit einem Farbstoff versehen ist. Der Farbstoff reagiert mit dem Epoxidharz unter Veränderung des Farbtons, wodurch auf den Zustand und den Verlauf der Aushärtung des Kunstharzes geschlossen werden kann. Das Hinzufügen eines Farbstoffs kann zudem dazu führen, dass sich das Kunstharz deutlicher vom Hintergrund absetzt. Dies kann die visuelle Erkennung vereinfachen, jedoch nicht ersetzen.

In anderen Industriezweigen gibt es sensorbasierte Ansätze zur Überwachung von Arbeitsvorgängen, in denen Kunstharzprodukte eingesetzt werden. Zum Beispiel wird in [33] ein Verfahren und System zum Aushärten von Bauteilen aus Harzverbundwerkstoffen in einem Autoklav beschrieben, die bspw. in Flugzeugen, Marine- und Landfahrzeugen eingesetzt werden können. Dabei wird mittels Thermographiekameras die Oberflächentemperatur des aushärtenden Bauteils erfasst. Abhängig von der Intensität der gemessenen IR-Strahlung wird die Temperatur im Autoklav angepasst, damit die Aushärtung des Bauteils einer festgelegten idealen Heiz- und Kühlrampe folgt, um ein optimales Aushärteergebnis zu erzielen. In [34] wird ein Verfahren zur Reparatur unterirdischer Rohrleitungen mittels lichthärtendem Harz mit Überwachung des Aushärtezustandes vorgestellt. Dabei wird ein mit Harz imprägnierter Schlauchliner in das zu reparierende Rohr eingeführt und anschließend aufgeblasen, um einen Kontakt zur Innenwand herzustellen. Die Aushärtung erfolgt durch die Bestrahlung mit einer Lichtquelle, wodurch der Aushärtevorgang im Harz ausgelöst wird. Dabei steigt die Temperatur des Schlauchliners an. Die Temperaturüberwachung erfolgt durch nicht näher beschriebene Infrarotsensoren, die die Oberflächentemperatur des Schlauchliners erfassen. Die Temperatursensoren sind auf einem beweglichen Träger aufgebracht, der entlang der Rohrleitung bewegt wird. Wenn der letzte Temperatursensor eine Temperatur erfasst, die im definierten Temperaturbereich liegt, ist die Aushärtung des Harzes abgeschlossen.

Die vorgestellten Lösungsansätze in [33] und [34] zeigen, dass es möglich ist, die Temperatur von Kunstharzen sensorbasiert zu überwachen und dadurch Einfluss auf die Prozesse zu nehmen. Eine Übernahme der beschriebenen Ansätze für eine sensorbasierte Kunstharzerkennung ist nicht zweckmäßig, da sich die Anwendungsbeispiele zu stark von der Kunstharzinjektion beim Ankerbohr- und -setzprozess unterscheiden. Nach dem derzeitigen Wissensstand existiert bislang kein Ansatz zur sensorbasierten Kunstharzerkennung bei der Ankerinstallation.

2.4 Anforderungen an eine sensorbasierte Kunstharzerkennung

Für eine automatische bedarfsgerechte Kunstharzinjektion ist eine sensorbasierte Erkennung des Kunstharzaustritts notwendig. Im Folgenden werden grundsätzliche Anforderungskriterien an einen Ansatz zur sensorbasierten Kunstharzerkennung definiert.

1. **Genauigkeit:** Ein Austritt von Kunstharz während des Injektionsvorgangs im Bereich des Ankerkopfes muss sicher erkannt werden (Sensitivität). Auch darf nicht fälschlicherweise auf einen Kunstharzaustritt geschlossen werden, indem z. B. ein Austritt von Wasser aus dem Ankerbohrloch mit einem Kunstharzaustritt verwechselt wird (Spezifität). Dabei ist aufgrund der Sicherheitsanforderungen unter Tage die Spezifität höher zu gewichten.
 - a. Um eine hohe Genauigkeit erreichen zu können, muss der relevante Bereich vollständig erfasst werden. Der relevante Bereich besteht aus der Ankerplatte und der die Ankerplatte direkt umgebenden Gesteinsoberfläche. Ein Kunstharzaustritt erfolgt nicht gleichmäßig um eine Ankerplatte. Ebenfalls variiert die Menge des ausgetretenen Kunstharzes.
2. **Geschwindigkeit:** Eine schnelle Erkennung des Kunstharzaustritts muss möglich sein, um Kunstharzüberschuss zu reduzieren. Voraussetzend dafür ist, dass das Messprinzip der gewählten Sensortechnologie zur Erfassung des Kunstharzaustritts kurze Reaktionszeiten ermöglicht. Der Ansatz als Ganzes soll mindestens genauso schnell austretendes Kunstharz erkennen und eingreifen wie eine bedienende Person. Die Zeitspanne zwischen Kunstharzaustritt und Eingriff setzt sich zusammen aus der Zeit, die nötig ist, damit genug Kunstharz ausgetreten ist, um für das menschliche Auge sichtbar zu werden, und der menschlichen Reaktionszeit. Da hierzu in der vorliegenden Anwendung keine Erfahrungswerte vorliegen, wird auf Daten zur Verkehrssicherheit zurückgegriffen: Die menschliche Reaktionszeit variiert und liegt abhängig von der individuellen körperlichen und geistigen Verfassung von 0,5 bis zu 2 s, wobei ca. 1 s als realistische Annahme angesehen wird [35]. Allerdings sind die folgenden Unterschiede im Vergleich zum Straßenverkehr zu beachten: Kunstharzaustritt entsteht nicht unerwartet, sondern die bedienende Person wartet auf das Eintreten dieses Ereignisses. Jedoch ist aufgrund der Sicherheitsanforderungen unter Tage davon auszugehen, dass die bedienende Person den Injektionsvorgang erst stoppt, wenn sie sich sicher ist, dass ausreichend Kunstharz injiziert wurde, sodass der Anker vollständig mit Kunstharz umschlossen ist. Dies ist erforderlich zur Gewährleistung einer ausreichenden Installationsqualität. Zudem sind die Sichtverhältnisse in der Regel ungünstig. Insgesamt wird daher angenommen, dass tendenziell die Reaktionszeit bei der Kunstharzinjektion verglichen mit einer Bremsung im Straßenverkehr größer ist. Daher wird in dieser Arbeit eine Erkennung innerhalb von 2 s nach dem Kunstharzaustritt angestrebt.

3. **Integrierbarkeit:** Der Ansatz muss in die bestehende Maschinentechnik und Arbeitsprozesse integrierbar sein. Das heißt, dass alle Komponenten direkt auf den Ankerbohrwagen angebracht werden können, ohne den Ankerbohr- und -setzprozess zu behindern. Auch sind keine zusätzlichen Arbeitsschritte erforderlich.
 - a. Ein Kunstharzaustritt muss berührungslos erfasst werden. Ansonsten kann das austretende Kunstharz das Sensorsystem verunreinigen und die Erkennung beeinträchtigen, sodass eine regelmäßige Reinigung notwendig wäre.
 - b. Eine Erkennung muss unabhängig von den Lichtverhältnissen möglich sein. An dem Einsatzort oder dem Ankerbohrwagen befindliche Licht- und Wärmequellen dürfen keinen störenden Einfluss ausüben. Außerdem soll die Erkennung keine aktive Beleuchtung erfordern.
 - c. Das Sensorsystem muss eine kompakte Bauweise haben.
 - d. Das Sensorsystem muss robust gegenüber den anspruchsvollen Arbeits- und Umgebungsbedingungen sein.
4. **Flexibilität:** Bei einer Änderung der Umgebungsbedingungen und/oder des Kunstharzproduktes, muss der Ansatz mit wenig Aufwand an die jeweilige Situation angepasst werden können. Außerdem muss der Ansatz herstellerunabhängig anwendbar sein, sodass ein Austausch von Komponenten einfach durchgeführt werden kann.

3 Technologien zur sensorbasierten Kunstharzerkennung

Nach derzeitigem Stand wird der Injektionsvorgang in der Regel beendet, sobald die bedienende Person austretendes Kunstharz im Bereich der Ankerplatte sieht. Eine Möglichkeit ist die visuelle Erkennung durch die bedienende Person durch ein Kamerasystem zu ersetzen. Dafür kommen die im sichtbaren Spektralbereich arbeitenden Kamerasysteme in Frage. Das menschliche Auge erkennt Objekte in einem Bild anhand von Farbe, Form und Textur [36]. Durch den Einsatz von Algorithmen wird der Sehvorgang nachgeahmt [36]. Zur Objekterkennung in Bildern stehen eine Reihe von konventionellen Segmentierungsverfahren zur Verfügung. Diese können in pixel-, kanten- und regionenorientierte sowie modell- und texturbasierte Verfahren eingeteilt werden [36]. Seit einigen Jahren werden auch zunehmend neuronale Netze zur Bilderkennung eingesetzt.

Eine weitere Möglichkeit zur sensorbasierten Erkennung von Kunstharz ist die Messung der eintretenden Temperaturerhöhung. Für die Temperaturmessung sind eine Vielzahl von Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien auf dem Markt erhältlich. Grundsätzlich kann zwischen berührender und berührungsloser Temperaturmessung unterschieden werden. Bezogen auf die Temperaturmessung ist unter einem berührend arbeitenden Sensor zu verstehen, dass dieser die Temperatur des Messobjekts annimmt. Dafür müssen der Sensor und das Messobjekt in einem ausreichend langen und intensiven thermischen Kontakt sein. Im Gegensatz dazu, nehmen berührungslos arbeitende Sensoren nicht die Temperatur des Messobjekts an. [37] Aus der Gruppe der berührend arbeitenden Sensoren sind aufgrund ihres weit verbreitenden Einsatzes in der Industrie das Widerstandsthermometer und das Thermoelement genannt. Diese ermöglichen eine elektrische Temperaturmessung. [38–40] Zu den berührungslos arbeitenden Sensoren zählen Pyrometer und IR-Kameras [41].

Im Folgenden werden die genannten Sensortechnologien vorgestellt. Dabei werden der Aufbau und die Funktionsweise sowie die wesentlichen Eigenschaften der jeweiligen Sensoren beschrieben. Anschließend werden die betrachteten Sensortechnologien anhand der in Kapitel 2.4 definierten Anforderungen an eine sensorbasierte Kunstharzerkennung bewertet und abschließend eine Sensortechnologie ausgewählt.

3.1 RGB-Kamera

RGB-Kameras arbeiten im sichtbaren Spektralbereich, der sich über den Wellenlängenbereich von $0,38\ \mu\text{m}$ bis $0,78\ \mu\text{m}$ erstreckt und durch den Empfindlichkeitsbereich der Lichtrezeptoren

des menschlichen Auges definiert ist. Dabei wird hauptsächlich an einem Objekt reflektierte Strahlung einer Lichtquelle, z. B. der Sonne oder einer künstlichen Beleuchtung, erfasst und bildlich dargestellt. Die Farbe und Helligkeit eines Objekts ergibt sich aus dessen wellenlängenabhängigen Reflexions- und Absorptionsverhalten für Umgebungslicht [42]. [43] Wie in Abbildung 3-1 zu sehen ist, grenzt an den sichtbaren Spektralbereich mit größeren Wellenlängen der infrarote Spektralbereich, in dem die IR-Kameras arbeiten, die in Kapitel 3.3.3 behandelt werden.

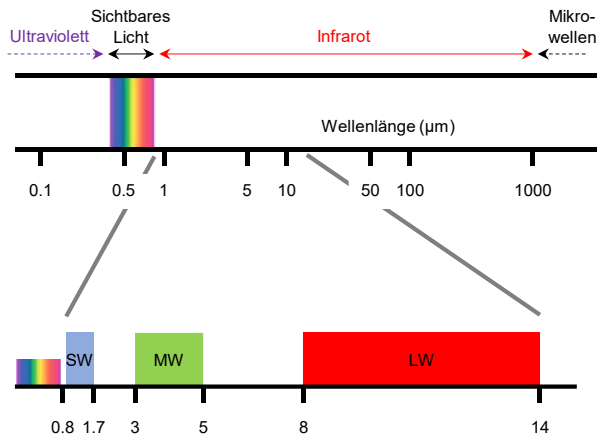


Abbildung 3-1: Strahlungsspektrum mit sichtbarem Spektralbereich und infraroten Spektralbereich sowie dessen Einteilung, in Anlehnung an [43]

Der Ursprung des Begriffs Kamera liegt in der lateinischen Bezeichnung „Camera obscura“, was übersetzt „dunkle Kammer“ bedeutet und auf die Lochkamera zurückzuführen ist. Die Lochkamera ist eine mit einer kleinen Öffnung versehene dunkle Kammer. Fallen Lichtstrahlen durch die schmale Öffnung, werden diese selektiert und eine Abbildung der Außenwelt auf der Rückwand erstellt. Das Grundprinzip wird auch heutzutage angewendet, sodass jede digitale Kamera als Hauptkomponente ein Objektiv als abbildendes Element und einen Bildsensor als Umsetzungseinheit hat. [44]

Im Folgenden werden die Hauptkomponenten eines Kamerasystems beschrieben.

Die Aufgabe des Objektivs ist es, eine Szene auf den Bildsensor abzubilden. In der einfachsten Ausführung besteht das Objektiv aus einer Linse. Allerdings ist eine Kombination aus mehreren Linsen in der Praxis gebräuchlich. Im Brennpunkt werden die Lichtstrahlen zusammengeführt bzw. fokussiert. Der Abstand dieses Punktes zur Hauptebene der Linse ist die Brennweite. Es gibt Objektive mit fester und stufenlos verstellbarer Brennweite. Letztere werden auch als Zoomobjektive bezeichnet. Bei Objektiven mit Festbrennweiten ist der Bildwinkel im

Gegensatz zu Zoomobjektiven nicht veränderbar. Allerdings können beim Einsatz von Festbrennweiten hohe Bildqualitäten einfacher erreicht werden, weil die Anzahl der aufeinander abzustimmenden Linsen im Objektiv kleiner ist. Über die Blende wird der verwendbare Bereich des Objektivs begrenzt, wodurch der einfallende Lichtstrom auf dem Bildsensor reguliert wird. Zudem werden durch die Blende Abbildungsfehler reduziert, indem Randstrahlen ausgeblendet werden. Die Blendenzahl k (F-Zahl) gibt das Verhältnis der Brennweite zum Durchmesser der Blendenöffnung an. Mit steigender Blendenzahl wird die Blendenöffnung kleiner und die Schärfentiefe steigt. [44]

Der Bildsensor wandelt die Lichtverteilung einer abzubildenden Szene in elektrische Signale um. Er ist in der Regel zweidimensional und setzt sich aus einzelnen Pixeln (Bildpunkten) zusammen. Die Gesamtzahl an Pixeln (Bildpunkten) wird als Auflösung bezeichnet. Je mehr Pixel die Sensorfläche aufweist, desto höher ist die Auflösung und somit detailreicher das Bild. Im sichtbaren Spektralbereich werden heutzutage CMOS-Sensoren und CCD-Sensoren als Bildsensoren in Kameras eingesetzt. Diese beruhen auf dem inneren Photoeffekt in Halbleitern. Bei einem CCD-Sensor findet eine Zerlegung des Bildes in Bildpunkte (Pixel) statt, sodass eine Bildpunktstruktur, horizontal als auch vertikal, entsteht. Die Auslesung der Bildpunkte erfolgt zeilenweise. Zwar weist ein CMOS-Sensor die gleiche Bildpunktstruktur auf, allerdings liegt eine deutliche Abgrenzung der einzelnen Bildpunkte voneinander vor, sodass bei der Auslesung jeder Bildpunkt direkt adressiert wird. [44]

Die Pixel eines Bildsensors sind üblicherweise helligkeitsempfindlich, jedoch nicht farbeempfindlich. Um Farbinformationen zu gewinnen, muss die einfallende Strahlung in mindestens drei Farbanteile getrennt werden. Das sind die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau. Eine etablierte Möglichkeit zur Generierung von Farbbildern ist es vor jeden Pixel ein Rot- Grün- oder Blaufilter anzuordnen, sodass ein Pixel die lokale Information für eine Farbe aufweist. Weitverbreitet ist die Anordnung der Farbfilter nach dem Bayer-Muster, das in einer Ausführung in Abbildung 3-2 dargestellt ist. Das Bayer-Muster setzt sich aus einem 2×2 Pixel großen Grundmuster zusammen. Die zwei Pixel mit Grünfilter sind diagonal angeordnet und dazu angrenzend liegt ein Pixel mit Rot- oder Blaufilter. Insgesamt sind vier Anordnungen möglich. Dabei umfasst der Rot- und Blauanteil jeweils ein Viertel der Pixel und der Grünanteil die Hälfte. Der Grünanteil ist höher, weil dieser am meisten zum Schärfeeindruck beiträgt. Durch den Einbezug der Farbwerte der Nachbarpixel können die fehlenden Farbinformationen der beiden anderen Grundfarben durch Interpolation rekonstruiert werden, sodass anschließend ein Pixel Farbwerte zu allen drei Grundfarben hat. Der Rekonstruktionsprozess des Farbbildes wird als Demosaicing bezeichnet. [44–46]

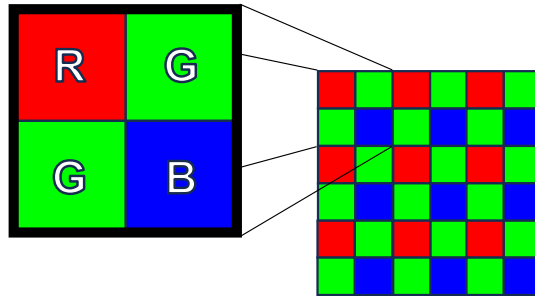


Abbildung 3-2: Aufbau eines Bayer-Musters, in Anlehnung an [44–46]

3.2 Berührende Temperaturmessung mit Widerstandsthermometer und Thermoelement

3.2.1 Widerstandsthermometer

Beim Widerstandsthermometer wird von der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes (Messwiderstand) Gebrauch gemacht. Der Messwiderstand ändert sich mit Zu- oder Abnahme der einwirkenden Temperatur. Dabei wird der Spannungsabfall, hervorgerufen durch einen konstanten Messstrom, am Messwiderstand gemessen. Um eine Erwärmung des Messwiderstands durch den Messstrom zu verhindern, muss dieser möglichst klein sein. Empfohlen wird ein Messstrom von maximal 1 mA. [39, 47]

Für den industriellen Einsatz werden überwiegend Platin-Messwiderstände verwendet. Diese heben sich bspw. durch hohe chemische Beständigkeit, leichte Bearbeitbarkeit, definierten Temperaturverlauf und hohe Stabilität hervor. Platin-Messwiderstände werden für Messungen im Temperaturbereich von -200 °C bis 850 °C eingesetzt. Häufig werden Pt100-Widerstände verwendet. Sie besitzen bei 0 °C einen Nennwiderstand von 100 Ω. [39, 41, 47]

In Abbildung 3-3 ist der Aufbau eines Mantel-Widerstandsthermometers dargestellt. In der Regel setzt sich ein Widerstandsthermometer aus einem Messwiderstand (Temperatursensor), den Innenleitungen, dem Isolationsmaterial und dem Einsatz- bzw. Schutzrohr zusammen. Der Messwiderstand kann drahtgewickelt oder als Dünnschicht-Messwiderstand ausgeführt sein. Beim Dünnschicht-Messwiderstand wird eine Platinschicht auf ein Keramiksubstrat aufgebracht. Kennzeichnend ist hier die sehr geringe Baugröße und hohe Vibrationsbeständigkeit. Beim drahtgewickelten Messwiderstand wird dieser durch ein Pulver in einem Keramikrohr umschlossen (Keramikwiderstand) oder in einem Glaskörper eingeschmolzen (Glas-Messwiderstand). Ein Glas-Messwiderstand weist ebenfalls eine hohe Vibrationsbeständigkeit auf. [39, 47–49]

Für besonders anspruchsvolle Anwendungen werden Widerstandsthermometer sowie Thermoelemente zusätzlich geschützt. An dieser Stelle sei auf die Ausführungen zu Armaturen und

Schutzrohre in [39] verwiesen. Der Einfluss der Eigenwiderstände der Anschlussleitungen und deren temperaturabhängige Änderungen können durch die Drei- oder Vierleitertechnik kompensiert werden. [39, 40]

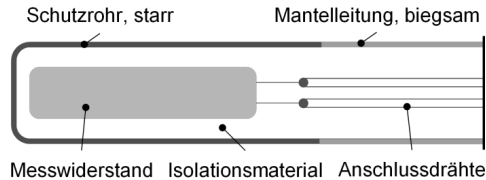


Abbildung 3-3: Schematischer Aufbau eines Mantel-Widerstandsthermometers, in Anlehnung an [49]

3.2.2 Thermoelement

Beim Thermoelement wird der thermoelektrische Effekt genutzt, auch bekannt als Seebeck-Effekt. Dafür werden zwei metallische Leiter mit unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit einseitig miteinander verbunden (Messstelle mit Thermopaar). Liegt ein Temperaturunterschied entlang der beiden Leiter vor, kann eine Thermospannung an den offenen Enden (Vergleichsstelle), gemessen werden. Dabei stellt die Thermospannung die Differenz der absoluten Thermospannungen der zwei metallischen Leiter dar. Die Größe der Thermospannung ist von den Leitermaterialien und dem Temperaturunterschied zwischen Mess- und Vergleichsstelle abhängig. Wenn die Temperatur an der Mess- und Vergleichsstelle gleich ist, kann keine Thermospannung gemessen werden. Die gemessene Thermospannung ist ein Maß für die Temperaturdifferenz zwischen Mess- und Vergleichsstelle. Um die absolute Temperatur zu berechnen, muss die Temperatur an der Vergleichsstelle bekannt sein. [39, 50]

In Abbildung 3-4 ist das Funktionsprinzip eines Thermoelements schematisch dargestellt. Ein Thermoelement besteht aus der Messstelle mit Thermopaar, die der zu messenden Temperatur ausgesetzt ist. Ausgleichsleitungen werden bei größerer Entfernung zwischen Mess- und Anzeigeort eingesetzt. Diese bestehen aus einem Material mit vergleichbaren thermoelektrischen Eigenschaften wie das Thermopaar. Damit wird verhindert, dass eine Thermospannung an den Verbindungsstellen zum Thermopaar entsteht. An der Vergleichsstelle werden die Ausgleichsleitungen mit den Anschlussklemmen des Messgerätes verbunden. Die dabei entstehenden zusätzlichen Thermospannungen heben sich aufgrund der umgekehrten Vorzeichen auf. An der Vergleichsstelle wird die Temperatur auf einem konstanten Wert gehalten (z. B. 50 °C) oder die Umgebungstemperatur gemessen. [38, 39]

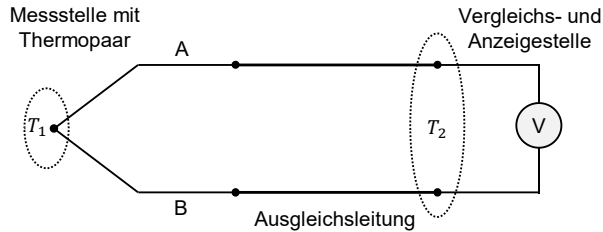


Abbildung 3-4: Funktionsprinzip eines Thermoelements mit Ausgleichsleitungen, in Anlehnung an [38, 39]

Die Thermospannung liegt in der Größenordnung $\mu\text{V/K}$. Aus diesem Grund ist laut Nau [39] die Messung im Bereich von $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht empfehlenswert. In diesem Bereich ist der Abstand zur Vergleichsstellentemperatur zu klein, um eine störungsfreie Messung zu gewährleisten. Anderenfalls müsste die Vergleichsstellentemperatur deutlich gesenkt oder gesteigert werden. [39]

Thermoelemente können bei sehr hohen Temperaturen eingesetzt werden, was einen Vorteil gegenüber dem Widerstandsthermometer darstellt. Der messbare Temperaturbereich liegt von $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis ca. $2300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ein Thermoelement ist massearm und besitzt eine kleine Wärmekapazität. Dadurch wird der Endwert der Temperatur sehr schnell erreicht. Jedoch haben Thermoelemente eine geringere Messgenauigkeit aufgrund der niedrigen Thermospannung und eine schlechtere Langzeitstabilität. [38, 39]

Die zwei metallischen Leiter werden durch Verschweißen oder Verlöten miteinander verbunden [39]. Für den Einsatz in aggressiven Umweltbedingungen können Mantelthermometer eingesetzt werden. Dies sind Thermoelemente, die von einem dünnen Edelstahlmantel umhüllt sind. [38] Mantelthermoelemente besitzen eine hohe Biegsamkeit und Erschütterungsfestigkeit sowie sehr kurze Ansprechzeiten [39].

Ansprechzeiten für Widerstandsthermometer und Thermoelement

Bei der berührenden Temperaturmessung wird die Temperaturangleichung bei einem Temperatursprung durch thermische Widerstände und Massen des Sensors beeinflusst. Der Einsatz von kleinen Sensoren und dünnenschichtigen wärmeleitenden Materialien wirkt sich positiv auf die Ansprechzeiten aus. Im Vergleich zu Widerstandsthermometern haben Thermoelemente aufgrund der geringeren thermischen Masse kürzere Ansprechzeiten. Jedoch steigen die Ansprechzeiten deutlich an, wenn sie aufgrund des Einsatzes in anspruchsvollen Umgebungsbedingungen in Schutzrohren eingesetzt werden. Für die Messung der Ansprechzeit wird die Temperatur sprunghaft verändert und dabei das dynamische Verhalten des Sensors aufgezeichnet. Die Messung erfolgt in fließendem Wasser oder strömender Luft bei definierten Messbedingungen. Die Ansprechzeit wird ermittelt, indem der Zeitraum gemessen wird in dem

der Messwert 50 % (Halbwertszeit) und 90 % (Neunzehntelzeit) des Temperatursprungs erreicht hat. Ein Messeinsatz mit Thermoelement nach DIN 43735 hat bei der Messung im Wasser bei 6 mm Durchmesser eine Neunzehntelzeit von 1,0 s bis 1,5 s und bei 8 mm Durchmesser eine Neunzehntelzeit von 2,0 s bis 5,0 s. Wird ein Schutzrohr nach DIN 43772 Form 2 (Schutzrohr zum Einstecken/Einschweißen) verwendet, liegt bei der Messung im Wasser die Neunzehntelzeit zwischen 25 s und 40 s. Bei der Messung in der Luft sind die dazugehörigen Ansprechzeiten um ein Vielfaches höher. [39]

3.3 Berührungslose Temperaturmessung mit Pyrometer und IR-Kamera

Sowohl bei der Pyrometrie als auch bei der Infrarotthermographie wird die thermische Strahlung eines Messobjektes bzw. einer Messszene erfasst. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den zwei Technologien besteht darin, dass bei der Pyrometrie eine Durchschnittstemperatur oder ein zeitlicher Temperaturverlauf für ein verhältnismäßig kleines Messfeld ermittelt wird, wohingegen bei der Infrarotthermographie eine orts aufgelöste Temperatur- bzw. Strahlungsverteilung oder deren Änderung über die Zeit für einen meist größeren Messbereich dargestellt wird. Die Darstellung erfolgt bei der Infrarotthermographie in Form eines zweidimensionalen Bildes. [37]

Zu Beginn wird auf die wesentlichen physikalischen Grundlagen eingegangen, die in beiden Technologien Anwendung finden. Anschließend werden jeweils der Aufbau und die Funktionsweise von Pyrometer und IR-Kamera beschrieben.

3.3.1 Physikalische Grundlagen

Jeder Körper, dessen Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes (0 K bzw. -273,15 °C) liegt, emittiert elektromagnetische Strahlung. Diese wird als Wärme- oder Temperaturstrahlung bezeichnet. Die Intensität der emittierten Strahlung ist von der Temperatur des Körpers abhängig und steigt mit zunehmender Temperatur an. [51]

Eine ideale Strahlungsquelle ist ein schwarzer Körper, auch als schwarzer Strahler bezeichnet. Ein schwarzer Körper emittiert für jede Wellenlänge ein Maximum an möglicher Strahlung für eine Temperatur. Die Ausstrahlung ist richtungsunabhängig. Dabei gilt das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz mit der Formel (3-1). Der Emissionsgrad ε und Absorptionsgrad α eines schwarzen Körpers ist jeweils eins. Ein idealer schwarzer Körper existiert in der Natur nicht. Die Realisierung eines annähernd idealen schwarzen Körpers in der Praxis, häufig als Hohlraumstrahler, ist z. B. in [43] dargestellt. [51, 52]

$$\varepsilon = \alpha \quad (3-1)$$

Im Folgenden werden ausgewählte Strahlungsgesetze vorgestellt, mit denen der Zusammenhang zwischen der Temperatur und der emittierten Strahlung einer Strahlungsquelle aufgezeigt wird [37]. Ein grundlegendes Verständnis dieser Strahlungsgesetze ist erforderlich, um für eine zu erfassende Temperatur eine geeignete Sensorwahl treffen zu können.

Die von einer Strahlungsquelle (Körper) pro Zeiteinheit t emittierte Strahlungsenergie Q heißt Strahlungsleistung Φ . Die spezifische Ausstrahlung M ist die auf eine Fläche A (Strahlerfläche) bezogene in den Halbraum emittierte Strahlungsleistung Φ . Der Zusammenhang zwischen der spezifischen Ausstrahlung M und der Temperatur T wird mit dem Planckschen Strahlungsgesetz für den idealen Fall des schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ beschrieben. Für die spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers $M_{\lambda S}$ gilt:

$$M_{\lambda S} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (3-2)$$

Die Strahlungskonstanten c_1 und c_2 sind

$$c_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 = 3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \text{ und } c_2 = \frac{h \cdot c}{k_B} = 1,438786 \cdot 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{m}$$

und enthalten die universellen Konstanten Lichtgeschwindigkeit c , Plancksches Wirkungsquantum h und Boltzmann-Konstante k_B . [37, 51, 52]

In Abbildung 3-5 ist die spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers für Temperaturen zwischen 0 °C und 200 °C veranschaulicht. Die Ausstrahlung weist für jede Temperatur ein Maximum bei einer bestimmten Wellenlänge auf, die durch eine gestrichelte Linie markiert ist. Mit abnehmender Temperatur wird das Strahlungsmaximum kleiner und verschiebt sich zu größeren Wellenlängen hin.

Mittels des Wienschen Verschiebungsgesetzes wird bei gegebener Temperatur die Wellenlänge des Strahlungsmaximums berechnet [51]:

$$\lambda_{max} = \frac{2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T} \quad (3-3)$$

Wie in Abbildung 3-5 zu sehen ist, liegt das Strahlungsmaximum von Körpern im Raumtemperaturbereich (27 °C) sowie bei höheren (100 °C) und niedrigen Temperaturen (0 °C) im langwelligen Infrarotbereich bzw. grenzt an diesen an. Bei einer Wellenlänge von $\lambda = 2$ ist annähernd keine Ausstrahlung für den abgebildeten Temperaturbereich mehr vorhanden.

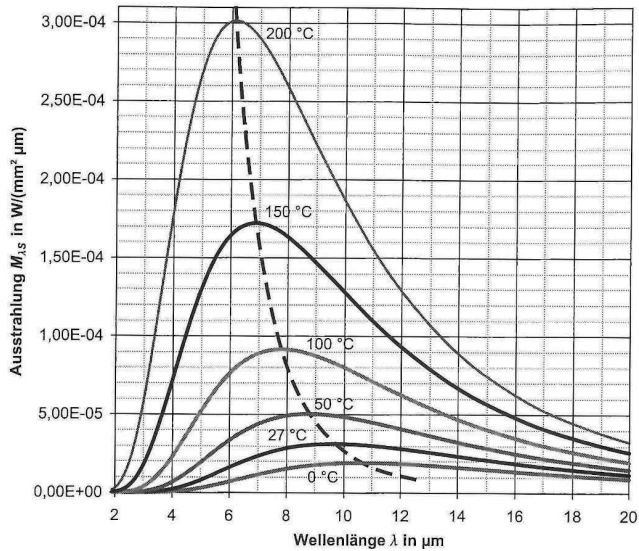


Abbildung 3-5: Plancksches Strahlungsgesetz für Temperaturen von 0 °C bis 200 °C in linearer Darstellung [52]

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz gibt die spezifische Ausstrahlung an, die sich bei einer Integration der Fläche unterhalb einer Isotherme im gesamten Wellenlängenbereich ergibt:

$$M_S = \sigma \cdot T^4 \quad (3-4)$$

Die Stephan-Boltzmann-Konstante σ ist ein Proportionalitätsfaktor. Die Formel (3-4) zeigt, dass sich die spezifische Ausstrahlung proportional zur vierten Potenz der Temperatur eines schwarzen Körpers erhöht. Verdoppelt sich die Temperatur, steigt die Gesamtstrahlung um das 16-fache. [51, 52]

Kein realer Körper kann mehr Strahlung emittieren als ein schwarzer Körper gleicher Temperatur. Dementsprechend besitzt ein realer Körper einen Emissionsgrad ε kleiner 1. Der Emissionsgrad wird gemäß Formel (3-5) als das Verhältnis aus spezifischer Ausstrahlung eines realen Körpers zu der eines schwarzen Körpers definiert. Wird der Emissionsgrad für eine bestimmte Temperatur und Wellenlänge angegeben, wird dieser als spektraler Emissionsgrad bezeichnet [52]. [51]

$$\varepsilon = \frac{M}{M_S} \quad (3-5)$$

Folglich muss das Stefan-Boltzmann-Gesetz für die praktische Anwendung um den Emissionsgrad ergänzt werden [51]:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3-6)$$

Ein realer Körper kann einen reflektierenden (Reflexionsgrad ρ) und transmittierenden (Transmissionsgrad τ) Strahlungsanteil haben. An dieser Stelle kann die Streuung im Körper vernachlässigt werden. Nach dem Energieerhaltungssatz gemäß Formel (3-7) müssen alle Strahlungsanteile zusammen einen Wert von 1 ergeben. [52]

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \text{ oder } \alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3-7)$$

Der Emissionsgrad realer Körper wird experimentell bestimmt. Er ist abhängig von der Temperatur, dem Material, der Oberflächenbeschaffenheit, der Abstrahlrichtung und dem Wellenlängenbereich. Hervorzuheben ist, dass sich der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf den Emissionsgrad bei Metallen besonders bemerkbar macht. Mit steigender Rauigkeit der Oberfläche erhöht sich der Emissionsgrad aufgrund des Hohlraumeffekts. Blanke Metalle weisen einen geringen Emissionsgrad und somit gemäß Formel (3-7) ein hohes Reflexionsvermögen auf. Zudem wird die Oberflächenbeschaffenheit durch Oxidation, Materialalterung, Ablagerungen und Verschmutzungen beeinflusst. Dadurch kann bei ursprünglich glatten Oberflächen die Rauigkeit und in der Folge auch der Emissionsgrad steigen. Detaillierte Ausführungen zu den verschiedenen Einflussparametern auf den Emissionsgrad sind z. B. in [43] zu finden. [51, 53]

3.3.2 Pyrometer

Pyrometer werden auch als Strahlungsthermometer bezeichnet. Die Bauarten von Pyrometern werden in der Regel anhand ihrer unterschiedlichen relativen spektralen Empfindlichkeit klassifiziert. Quotienten- und Spektralpyrometer messen in einem schmalen Wellenlängenbereich, während Bandstrahlungs- und Gesamtstrahlungs- pyrometer einen breiten Wellenlängenbereich erfassen. Bei der Messung mit einem Gesamtstrahlungs- pyrometer müssen die untere und obere Wellenlängengrenzen so gewählt werden, dass mindestens 90 % der von einem Messobjekt emittierten Strahlung erfasst wird. Die Wahl der Bauart wird durch die Anwendung bestimmt. Dabei sind die gestellten Genauigkeitsanforderungen sowie Kenntnisse über den Emissionsgrad und die Temperatur des Messobjektes zu berücksichtigen. [37, 52]

Die emittierte IR-Strahlung einer Messszene wird über das Objektiv gebündelt, wobei mittels einer Blende Randstrahlen ausgeblendet werden. Die gebündelte IR-Strahlung passiert das Filter, bevor sie auf den Sensor trifft. Damit wird der Spektralbereich, in dem gemessen wird, begrenzt. Der Sensor wird auch als Detektor bezeichnet. Üblicherweise werden Thermosäulen oder pyroelektrischen Sensoren als Detektoren eingesetzt. Es folgt die Signalverarbeitung mittels Mikroprozessortechnik. Die anschließende Signalausgabe kann digital oder analog erfolgen. [52]

Der Emissionsgrad stellt gemäß Formel (3-6) den Zusammenhang zwischen spezifischer Ausstrahlung eines realen Körpers und dessen Temperatur dar. Daher sind für die Ermittlung der Oberflächentemperatur Kenntnisse über den Emissionsgrad der zu erfassenden Messszene notwendig. Der Emissionsgrad wird im Pyrometer eingegeben. Ein zu niedriger oder hoher angenommener Emissionsgrad führt zur Anzeige eines inkorrekten Temperaturwertes. [52]

Weitere Bestandteile eines Pyrometers können z. B. eine Visiereinrichtung zur Anzeige des Messfeldes und des Messmittelpunktes, ein Blasaufsatz zum Schutz der Optik oder Kühleinrichtungen sein. [52] Neben portablen Pyrometern mit Anzeigeeinheit gibt es auch Pyrometer für den industriellen Einsatz.

3.3.3 IR-Kamera

IR-Kameras stellen die thermische Strahlungsverteilung einer Messszene bildlich dar. Weitere gängige Bezeichnungen sind Thermobildgerät, Thermokamera, Thermographiesystem, Wärmebildgerät oder Wärmebildkamera [51, 52]. Die von einem Körper oder einer Messszene emittierte Strahlung wird in einem zweidimensionalen Bild wiedergegeben, das auch als IR-Bild, Thermobild oder Wärmebild bezeichnet wird. [52]

IR-Kameras arbeiten nur in bestimmten Bereichen des Infrarotspektrums, das im elektromagnetischen Spektrum den Wellenlängenbereich von $0,78\text{ }\mu\text{m}$ bis 1 mm umfasst und sich zwischen dem sichtbaren Spektralbereich und dem Mikrowellenbereich befindet (siehe Abbildung 3-1). In der Literatur existieren verschiedene Unterteilungen des infraroten Spektralbereichs und Benennungen der Teilbereiche. Gemäß Vollmer und Möllmann [43] kann der Spektralbereich der IR-Strahlung für die IR-Bildgebung in kurzwelliges Infrarot (SW, engl.: short-wave) von etwa $0,9\text{ }\mu\text{m}$ bis $1,7\text{ }\mu\text{m}$, mittelwelliges Infrarot (MW, engl.: mid-wave) von etwa $3\text{ }\mu\text{m}$ bis $5\text{ }\mu\text{m}$ und langwelliges Infrarot (LW, engl.: long-wave) von etwa $8\text{ }\mu\text{m}$ bis $14\text{ }\mu\text{m}$ eingeteilt werden (siehe Abbildung 3-1). Ein wichtiger Grund für die Begrenzung auf diese Wellenlängenbereiche sind die Transmissionseigenschaften der Atmosphäre. Für die elektromagnetische Strahlung existieren Durchlassbereiche in der Atmosphäre, die als atmosphärische Fenster bezeichnet werden. Außerhalb der atmosphärischen Fenster wird die IR-Strahlung durch Absorption, Streuung und Reflexion geschwächt [51]. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Einteilung nach Vollmer und Möllmann [43] verwendet, da für die genannten Wellenlängenbereiche IR-Kameras angeboten werden. Eine weitere gängige Praxis ist das gesamte infrarote Spektrum ohne Lücken aufzuteilen. Hier sei z. B. auf die Einteilung in [42] und [53] verwiesen. [43]

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, wird bei einer RGB-Kamera vor allem reflektierte Strahlung einer natürlichen oder künstlichen Lichtquelle erfasst und bildlich dargestellt. Eine gleichmäßige und ausreichende Ausleuchtung ist entscheidend, für die Sichtbarkeit der Objekte im Bild. Die Arbeitsweise von Kameras aus dem kurzwelligen Infrarot ist vergleichbar mit der von RGB-Kameras [43]. Im Gegensatz dazu, wird im IR-Bild einer IR-Kamera aus dem mittelwelligen

und langwelligen Infrarot die thermische Strahlung der Messszene wiedergegeben und für den Betrachter sichtbar gemacht. Die Objekte einer Messszene stellen selbst die Strahlungsquellen dar. Eine zusätzliche Lichtquelle wird nicht benötigt, sodass IR-Kameras auch in Dunkelheit einsetzbar sind. [42, 43, 51]

Das IR-Bild stellt die Strahlungsintensitäten der aufgenommenen Messszene in unterschiedlichen Graustufen (Graustufenbild) oder Farben (Falschfarbenbild) dar. Die Darstellungsform ist relativ. Einer Graustufe oder einer Farbe ist kein absoluter Wert zugeordnet. Stattdessen wird bezogen auf die niedrigste und höchste erfasste Strahlungsintensität einer Messszene eine Abstufung vorgenommen. [54] Die Anzahl darstellbarer Graustufenwerte richtet sich nach der Bittiefe. So sind z. B. bei einem Graustufenbild mit einer Bittiefe von 8 Bit 256 Helligkeitsstufen möglich, von schwarz (Wert 0) bis weiß (Wert 255). Bei 12 Bit können 4096 und bei 16 Bit 65536 Helligkeitsstufen unterschieden werden. [43]

In Abbildung 3-6 sind die wesentlichen Unterschiede zwischen einer IR-Kamera und einer RGB-Kamera illustriert. Dieselbe Messszene wird mit beiden Sensortechnologien betrachtet und jeweils eine Abbildung erzeugt. Die Messszene beinhaltet ausgetretenes Kunstharz an einer Ankerplatte unmittelbar nach einem Injektionsvorgang. Für das schematische IR-Bild wird eine Falschfarben-Darstellung gewählt. Auf der Farbskala entsprechen Rottöne hohen Intensitäten und Blautöne niedrigen Intensitäten. Die Intensität korreliert dabei mit der Temperatur der Objekte. Aus dem IR-Bild lässt sich ableiten, dass das Kunstharz eine höhere Temperatur als der Ankerkopf und das umgebende Gestein hat. Im Gegensatz dazu können aus dem Bild der RGB-Kamera keine Rückschlüsse über die Temperaturverteilung gezogen werden. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 3-7 ein eingefärbtes (rechts) und ein nicht eingefärbtes IR-Bild (mittig) während des Injektionsvorgangs mit Kunstharzaustritt und entsprechenden RGB-Bild (links) nach der Installation gegenübergestellt. Die abgebildete Ankerplatte weist dabei einen Durchmesser von 150 mm auf. Das Kunstharz wird in den IR-Bildern visuell hervorgehoben, während es im RGB-Bild keinen starken Kontrast gegenüber der Gesteinsoberfläche aufweist.

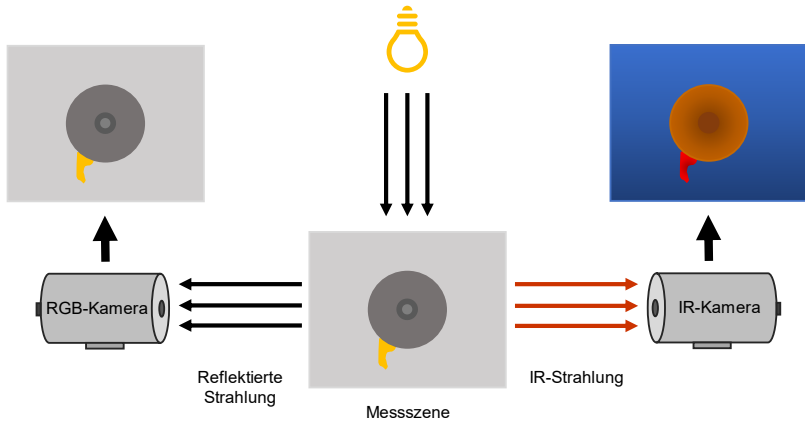


Abbildung 3-6: Unterschiede in der Bilddarstellung mit RGB-Kamera (links) und IR-Kamera (rechts) im mittel- und langwelligen IR-Bereich am Beispiel der Ankerinstallation, in Anlehnung an [43]

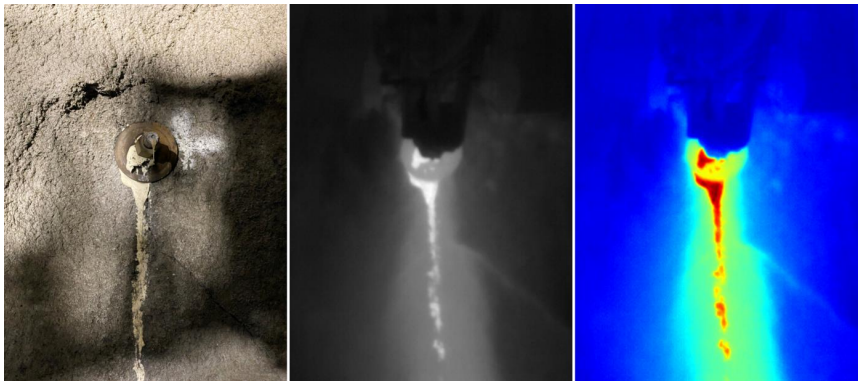


Abbildung 3-7: Kunstharzaustritt am Ankerkopf im RGB-Bild (links), IR-Bild in Graustufen-Darstellung (mittig) und IR-Bild in Falschfarben-Darstellung (rechts)

Der Aufbau einer IR-Kamera ist schematisch vereinfacht in Abbildung 3-8 dargestellt.

Die Optik bildet die Messszene auf den Detektor ab. Die eintreffende IR-Strahlung wird über Linsen (Objektiv) gesammelt und auf den Detektor fokussiert. Das Linsenmaterial muss im zu messenden Wellenlängenbereich durchlässig sein. Im langwelligen IR-Bereich bis $14\ \mu\text{m}$ ist der Einsatz von Germanium als Linsenmaterial etabliert. Glas ist für größere Wellenlängen undurchlässig. Gebräuchlich ist die Anbringung von Antireflexionsbeschichtungen, um den Transmissionsgrad zu erhöhen. Bei rauen Einsatzbedingungen wird die IR-Kamera in ein Schutzgehäuse eingebracht und es wird durch ein Schutzfenster gemessen. Als Schutzfenster

ist die Verwendung von Germanium ebenfalls weitverbreitet. Durch eine diamantähnliche Kohlenstoffschicht (DLC, engl.: diamond-like-carbon) wird das Germaniumfenster besonders robust und umweltbeständig. [55]

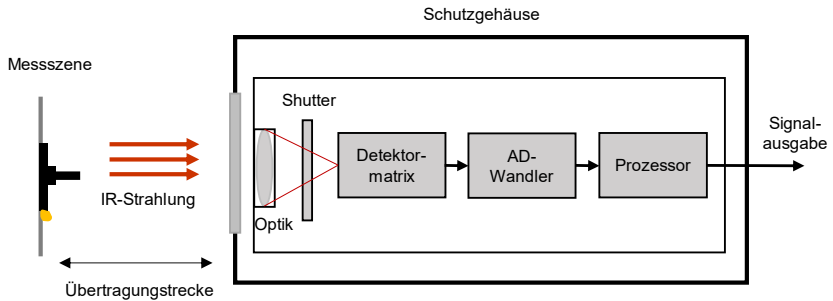


Abbildung 3-8: Schematischer Aufbau einer IR-Kamera, in Anlehnung an [52]

Der Detektor dient als Strahlungsempfänger. Er wandelt auftreffende infrarote Strahlungsenergie in elektrische Signale um. Gebräuchlich sind heutzutage IR-Kameras mit Detektormatrizen (FPA, engl.: focal plane array). Die Detektorelemente (Pixel) sind zeilen- und spaltenförmig angeordnet und erfassen das Messfeld gleichzeitig. Somit bildet jedes Detektorelement die Strahlung eines Flächenelements des Messfeldes ab. [37, 42, 43]

Grundsätzlich wird zwischen zwei Arten von Detektoren, den Quantendetektoren und den thermischen Detektoren, unterschieden. Quantendetektoren nutzen den photoelektrischen Effekt. Die durch die absorbierten Lichtquanten, auch Photonen genannt, freigesetzten Ladungsträger werden für den Strahlungsnachweis genutzt. Dabei gilt, dass der Energiegehalt eines Lichtquants von der Wellenlänge abhängig ist und mit größerer Wellenlänge abnimmt. Kennzeichnend für Quantendetektoren ist, dass diese auf die auftreffende Strahlung sehr schnell reagieren. Quantendetektoren werden meistens gekühlt betrieben, um das Signalrauschverhältnis zu verbessern. [51, 52]

Bei thermischen Detektoren führt die auftreffende Strahlung zu einer Temperaturänderung des Detektors, die in ein elektrisches Ausgangssignal umgewandelt wird. Abhängig vom Wirkprinzip wird die Temperaturänderung in eine Widerstandsänderung bei Bolometern, in eine Spannungsänderung bei Thermosäulen und in eine Ladungsänderung bei pyroelektrischen Empfängern umgewandelt [53]. Thermische Detektoren arbeiten aufgrund des indirekten Strahlungsnachweises langsamer als Quantendetektoren. Die Betriebsweise ist typischerweise ungekühlt. [52]

Für zivile Anwendungen werden in IR-Kameras vorwiegend Mikrobolometerarrays eingesetzt. Dabei wird die Temperaturabhängigkeit des Bolometerwiderstands genutzt. Das Detektorele-

ment wird von einem konstanten Strom durchflossen, sodass die abgegriffene Spannungsänderung der Widerstandsänderung proportional ist. Der Aufbau erfolgt als Mikrobrücke im Vakuum, um eine hohe thermische Isolation zu erzielen. Das Widerstandsmaterial wird als eine dünne Schicht auf eine Membran (Trägerschicht) aufgebracht. Als Widerstandsmaterial dienen Vanadiumoxid (VO_x) und amorphes Silizium (a-Si). Getragen wird die Membran mittels zwei Stützen, die gleichzeitig zur elektrischen Kontaktierung dienen. Zusätzlich kann eine Reflektorschicht auf der Ausleseelektronik aufgebracht sein, um die Absorption der IR-Strahlung zu erhöhen. Die fortschreitende Verbesserung der thermischen Isolierung führt zu einer stetigen Reduzierung der Flächen der Detektorelemente und Erhöhung der Detektorelementzahl, sodass hohe räumliche Auflösungen erzielt werden können [42]. Es sind Größen von Mikrobolometern von $35 \times 35 \mu\text{m}^2$ und weniger erreichbar [56]. [52]

Infolge des thermischen Drifts von Mikrobolometerarrays benötigen IR-Kameras in definierten Zeitabständen eine Rekalibrierung. Bei einer gängigen Möglichkeit zur Rekalibrierung wird der Shutter für einige hundert Millisekunden vor den Detektor geschlossen, sodass eine einheitliche und bekannte thermische Szene vorliegt. Ein Shutter ist ein Verschluss im optischen Kanal (siehe Abbildung 3-8). Dabei wird ausgenutzt, dass die Temperatur des Shutters bekannt ist. Die erzeugten IR-Bilder dienen zur Berechnung von Korrekturfaktoren. Da in dieser Zeit nicht gemessen werden kann, besteht häufig die Möglichkeit den Zeitpunkt der Rekalibrierung manuell auszulösen. Der Vorgang wird auch als Inhomogenitätskorrektur (NUC, engl.: non-uniformity-correction) oder Flat-Field-Korrektur (FFC, engl.: flat-field-correction) bezeichnet. [43, 52, 56, 57]

Nachdem die auf der Detektormatrix auftreffende Strahlung in elektrische Signale umgewandelt wurde, werden diese durch einen Analog-Digital-Wandler digitalisiert. Mittels des Signalverarbeitungsprozessors erfolgt die Aufbereitung der digitalen Signale, sodass als Ergebnis ein IR-Bild der Messszene zur Verfügung steht, das direkt zur Anzeige gebracht und/oder an eine Schnittstelle weitergegeben wird. [52]

Bei portablen Kameras sind die Bedienelemente direkt am Kameragehäuse angebracht. Zur Verfügung stehen verschiedene Schnittstellen und Speichermöglichkeiten. Sie sind für den universellen Einsatz konzipiert. Im Gegensatz dazu haben stationäre Systeme häufig nur eine Schnittstelle, wie z. B. Ethernet, und die Bedienelemente sind nicht am Kameragehäuse angebracht. Sie werden auch als Einbausysteme bezeichnet und sind für den industriellen Einsatz entwickelt. Das Kameragehäuse wird den Anforderungen des Einsatzfalls entsprechend ausgewählt, um einen ausreichenden Schutz gegenüber den Einsatzbedingungen zu gewährleisten. [52]

3.4 Bewertung relevanter Sensortechnologien im Hinblick auf einen Einsatz zur Kunsthärzerkennung

Gemäß den in Kapitel 2.4 definierten Anforderungen muss ein Sensor eine vollständige und schnelle Erfassung des relevanten Bereiches, berührungslos und unabhängig von den Lichtverhältnissen, bei einer kompakten und robusten Bauweise ermöglichen. Die in diesem Kapitel weiter oben aufgeführten und beschriebenen Sensoren werden hinsichtlich ihrer Erfüllung der Anforderungskriterien für einen Einsatz zur Kunsthärzerkennung bewertet. In Tabelle 3-1 ist dargestellt, wie gut die Sensoren die gestellten Anforderungen erfüllen. Die Bewertung bezieht sich auf die messtechnischen Eigenschaften der zugrunde liegenden Sensortechnologie und nicht auf einzelne Sensormodelle auf dem Markt. Bei voller Erfüllung eines Anforderungskriteriums wird dies mit einem „+“ gekennzeichnet. Wird ein Anforderungskriterium nur bedingt erfüllt, wird ein „○“ eingetragen. Dies bedeutet, dass eine Erfüllung möglich ist, dafür jedoch zusätzlicher Aufwand erforderlich oder die Einsetzbarkeit eingeschränkt ist. Ein „-“ bedeutet, dass ein Anforderungskriterium nicht erfüllt wird.

Tabelle 3-1: Bewertung von Sensortechnologien zur Kunsthärzerkennung anhand definierter Anforderungskriterien

Anforderung Sensor	Genauigkeit	Geschwindigkeit	Integrierbarkeit				Flexibilität
			Berührungslos	Unabhängig von Lichtverhältnissen	Kompakt	Robust	
Widerstandsthermometer	-	○	-	+	+	+	+
Thermoelement	-	○	-	+	+	+	+
Pyrometer	○	+	+	+	+	○	+
IR-Kamera	+	+	+	+	+	○	+
RGB-Kamera	+	+	+	-	+	○	+

Anforderungskriterium: Genauigkeit

Um die Anforderung an eine hohe Genauigkeit erfüllen zu können, ist eine vollständige Erfassung des relevanten Bereiches durch den Sensor erforderlich. Der Messpunkt eines Widerstandsthermometers und eines Thermoelements ist auf die Berührungsstelle beschränkt. Somit kann mit einem einzigen Widerstandsthermometer oder Thermoelement der geforderte

Bereich nicht komplett erfasst werden. Auch bei einem Einsatz mehrerer Widerstandsthermometer oder Thermoelemente, bleibt die Erfassung lückenhaft. Daher wird die Anforderung bezüglich der Genauigkeit für diese Sensoren mit nicht erfüllt bewertet. Ein Pyrometer hat ebenfalls einen Messpunkt. Die Größe des Messpunktes ist dabei vom Objektiv und Abstand zum Messobjekt abhängig. Daher kann ein Pyrometer prinzipiell so ausgewählt und angebracht werden, dass der relevante Bereich vollständig erfasst wird. Da ein Pyrometer nur einen Messpunkt hat, wird ein Durchschnittswert für den zu erfassenden Bereich ermittelt. Dies beeinträchtigt die Messgenauigkeit. Folglich wird die Anforderung bezüglich der Genauigkeit für Pyrometer mit bedingt erfüllt bewertet. IR-Kameras und RGB-Kameras geben eine bildliche Darstellung der Messszene wieder, die aus vielen einzelnen Messpunkten besteht. Jeder einzelne Messpunkt stellt Informationen zu einem dazugehörigen Bereich der Messszene bereit. Aus diesem Grund kann die Anforderung an eine hohe Genauigkeit mittels IR- und RGB-Kamera voll erfüllt werden. Der Positionierung kommt dabei allerdings eine hohe Bedeutung zu, da keine verdeckten Bereiche erfasst werden können.

Anforderungskriterium: Geschwindigkeit

Widerstandsthermometer und Thermoelement benötigen Zeit um die Temperatur des Messobjektes, hier des Kunstharzes, anzunehmen. Wie weiter oben in diesem Kapitel beschrieben, sind sehr kurze Ansprechzeiten möglich, insbesondere bei Thermoelementen. Die Ansprechzeiten sind jedoch von mehreren Faktoren abhängig und können daher je nach Applikation deutlich steigen. Beispielsweise wären für die Messung der Kunstharztemperatur Sensoren mit breiter Kontaktfläche vorzuziehen, um einen größeren Oberflächenbereich zu erfassen. Mit größerer Kontaktfläche, erhöht sich auch die Ansprechzeit. Daher wird die Anforderung der schnellen Erfassung für das Widerstandsthermometer und Thermoelement mit bedingt erfüllt beurteilt.

Pyrometer und IR-Kameras messen die Strahlung, die von einem Objekt ausgeht. Dabei ist keine Angleichung der Temperatur an das Messobjekt erforderlich. Entsprechend ist dies kein limitierender Faktor der Ansprechzeit. IR-Kameras bieten den Vorteil, dass sie eine große Anzahl Messpunkte gleichzeitig erfassen können. Dadurch kann ein Kunstharzaustritt auch bei geringen Mengen und variierender Austrittsstelle schnell erkannt werden. RGB-Kameras sind ebenfalls in der Lage Messszenen mit einer hohen Bildfrequenz und Auflösung zu erfassen. Für Pyrometer, IR-Kamera und RGB-Kamera wird diese Anforderung mit voll erfüllt bewertet.

Anforderungskriterium: Integrierbarkeit

Berührungslos

Widerstandsthermometer und Thermoelemente sind berührend arbeitende Sensoren. Um eine Temperaturangleichung zu erzielen, ist eine mechanische Berührung mit dem Messobjekt, dem Kunstharz, erforderlich. Dahingegen sind Pyrometer, IR-Kamera und RGB-Kamera

durch ihre jeweilige Funktionsweise dazu in der Lage austretendes Kunstharz berührungslos zu erfassen und können somit diese Anforderung voll erfüllen.

Unabhängig von Lichtverhältnissen

Widerstandsthermometer und Thermoelemente arbeiten unabhängig von den Lichtverhältnissen, sodass sie diese Anforderung voll erfüllen können. Für Pyrometer und IR-Kameras wird diese Anforderung auch als voll erfüllt bewertet. Durch die exotherme Reaktion und den damit verbundenen Temperaturanstieg des Kunstharzes, ist die emittierte IR-Strahlung des Kunstharzes im Vergleich zum Hintergrund höher. Dennoch können intensive Wärmequellen das Messergebnis beeinflussen. Daher ist darauf zu achten, dass keine anderen starken Quellen von IR-Strahlung im Erfassungsbereich liegen. Bei einer IR-Kamera entsteht der Unterschied zwischen hellen und dunklen Bildbereichen durch Strahlungsunterschiede, sodass ein ausreichender Kontrast zwischen Kunstharz und Hintergrund möglich ist. Für die Erkennung mittels einer RGB-Kamera ist ebenfalls ein ausreichender Kontrast zwischen Kunstharz und Hintergrund notwendig. In diesem Fall hängt dies von den Farbunterschieden selbst als auch von den Lichtverhältnissen ab. Das in dieser Arbeit betrachtete Kunstharz hat eine weiß-gelbliche Farbe (siehe Abbildung 3-7). Der Hintergrund aus Gesteins- oder Spritzbetonoberfläche ist oft gräulich. Eine unzureichende und/oder ungleichmäßige Ausleuchtung sowie Schatten durch Maschinenteile und Gebirge können zu dunklen Bildern und Helligkeitsvariationen im Bild führen. Eine von den Lichtverhältnissen unabhängige Kunstharzerkennung ist mittels einer RGB-Kamera nicht möglich. Deshalb wird diese Anforderung mit nicht erfüllt beurteilt.

Kompakte Bauweise

Die Anforderung der kompakten Bauweise können Widerstandsthermometer und Thermoelemente abdecken. Dadurch dass der Messpunkt auf die Berührungsstelle beschränkt ist, haben diese geringe Durchmesser von wenigen Millimetern und können sehr kompakt ausgeführt werden. Bei einem Widerstandsthermometer gelingt dies z. B. durch den Einsatz eines Dünnschicht-Messwiderstandes. Verglichen mit Widerstandsthermometern und Thermoelementen sind insbesondere RGB-Kameras und IR-Kameras wesentlich größer. Allerdings können Pyrometer, RGB-Kameras und IR-Kameras aufgrund der berührungslosen Erfassung mit Abstand zum Kunstharz angebracht werden. Dadurch ergeben sich mehr Möglichkeiten hinsichtlich der Positionierung und größere Sensorabmessungen sind möglich, ohne den Ankerbohr- und -setzprozess zu beeinträchtigen. Daher wird in dieser Arbeit die Anforderung der kompakten Bauweise für Pyrometer, IR-Kamera und RGB-Kamera als voll erfüllt bewertet.

Robuste Bauweise

Wie weiter oben in diesem Kapitel erwähnt, besitzen Messwiderstände, insbesondere Dünnschicht-Messwiderstände und Glas-Messwiderstände, sowie Thermoelemente eine hohe Vib-

rationsbeständigkeit. Bei Widerstandsthermometern und Thermoelementen kann ein ausreichender Schutz bereits durch einfache Mittel erreicht werden. Durch den Einsatz in Schutzrohren können Widerstandsthermometer und Thermoelemente zusätzlich vor mechanischen und chemischen Einflüssen geschützt werden. Eine Vielzahl von Konstruktionen für verschiedenste Anwendungen ist dafür verfügbar. Daher wird die Anforderung der robusten Bauweise für die beiden Sensortechnologien als voll erfüllt beurteilt. Optische Systeme sind generell komplexer aufgebaut als Widerstandsthermometer und Thermoelemente. Sie bestehen aus mehr Komponenten, wovon einige empfindlich und/oder exakt justiert sind. Die Gefahr eines negativen Einflusses durch Arbeits- und Umgebungsbedingungen ist dadurch höher. Insbesondere muss bei optischen Systemen das Öffnungsfenster zur Strahlungserfassung vor Verschmutzung und Beschädigung geschützt werden. Zum Einsatz in rauen Arbeits- und Umgebungsbedingungen können Kameras und Pyrometer in geeigneten Gehäusen verbaut werden. Auf dem Markt sind Schutzgehäuse in unterschiedlichen Abmessungen, Materialien und Schutzarten verfügbar. Auch werden verschiedene Vorrichtungen zum Schutz und Sauberhalten des Öffnungsfensters, wie z. B. Schutzklappen und Blasaufsätze, angeboten. Die Anforderung der robusten Bauweise wird für IR-Kamera und RGB-Kamera mit bedingt erfüllt bewertet, da ein erhöhter Aufwand erforderlich ist, um einen ausreichenden Schutz zu gewährleisten. Zwar sind Pyrometer weniger komplex als IR-Kameras und RGB-Kameras aufgebaut, allerdings ist auch bei dieser Sensortechnologie aufgrund des Öffnungsfensters ein größerer Aufwand notwendig, weswegen die Anforderung der robusten Bauweise ebenfalls mit bedingt erfüllt bewertet wird.

Anforderungskriterium: Flexibilität

Die Anforderung der Flexibilität wird insbesondere durch eine herstellerunabhängige Auswertemethodik sichergestellt. Bei der Auswertemethodik ist darauf zu achten, dass keine Funktionen integriert sind, die nur bestimmte Hersteller anbieten. Für die in diesem Kapitel betrachteten Technologien ist eine Vielzahl an Sensormodellen verschiedener Hersteller auf dem Markt verfügbar, sodass eine große Auswahl gegeben ist. Aus diesem Grund wird die Anforderung der Flexibilität für die betrachteten Sensortechnologien mit voll erfüllt bewertet.

Auswahl der Sensortechnologie

Die IR-Kamera erfüllt die in Kapitel 2.4 definierten Anforderungen für einen Einsatz zur sensorbasierten Kunstharzerkennung am besten. Wie in Kapitel 2.3.3 gezeigt, existieren bisher keine Sensorsysteme und Ansätze, die unmittelbar auf die Kunstharzerkennung während des Injektionsvorgangs übertragbar sind. Daher wird in dieser Arbeit ein sensorbasierter Ansatz zur Kunstharzerkennung basierend auf Infrarotthermographie entwickelt.

Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, wurden in einem Versuch unter Tage Kunstharztemperaturen von bis zu 88,7 °C gemessen. Aus den Versuchsergebnissen lässt sich schließen, dass

das Strahlungsmaximum des Kunstharzes im langwelligen IR-Bereich liegt, das den Wellenlängenbereich von 8 μm bis 14 μm umfasst (siehe Abbildung 3-5). Daher muss für die Kunstharzerkennung eine IR-Kamera gewählt werden, die im langwelligen IR-Bereich arbeitet.

Für Kunstharz, Ankerkopf, Injektionseinheit, Gestein und Spritzbeton wird der Emissionsgrad als hoch eingeschätzt. Glänzende Metalloberflächen, die zu starken Reflexionen führen, liegen in der betrachteten Messszene nicht vor. Sie können auf dem Ankerbohrwagen vorkommen und dort auch nur in den Bereichen, die weniger stark von den rauen Umgebungsbedingungen betroffen sind. Auch ist davon auszugehen, dass die abgegebene Wärmemenge beim Kunstharzaustritt zu einem deutlichen Temperaturanstieg führt, sodass bestehende Emissionsgradunterschiede in der unmittelbaren Umgebung für die Kunstharzerkennung vernachlässigbar sind.

4 Ansatz zur Erkennung eines Kunsthärzaustritts mittels Infrarotthermographie

Die Entwicklung des thermographischen Ansatzes erfolgt unter Hinzunahme der in Kapitel 2.4 festgelegten Anforderungen bezüglich einer genauen und schnellen Erkennung bei hoher Integrierbarkeit in die bestehende Maschinenteknik und Arbeitsprozesse sowie hoher Flexibilität. Zu Beginn dieses Kapitels wird der Aufbau des IR-Kamerasystems beschrieben. Dabei wird auf die Positionierung auf dem Ankerbohrwagen, die Auswahl der Hardwarekomponenten und eines geeigneten Gehäusekonzepts sowie die Datenaufnahme eingegangen. Bei den anschließenden Laboruntersuchungen wird das Verhalten des IR-Kamerasystems bei einer Laufzeit von mehreren Stunden sowie bei verschiedenen Umgebungstemperaturen betrachtet. Daraus werden Empfehlungen für den zukünftigen Kamerabetrieb abgeleitet. Des Weiteren werden anhand eines Datensatzes aus einer untertägigen Testmessung Untersuchungen zum Kunsthärzaustritt während des Injektionsvorgangs durchgeführt. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die Entwicklung des thermographischen Ansatzes. Dieser wird abschließend beschrieben und erläutert.

Die Testmessung wurde im Eisenerzbergwerk Kiruna des schwedischen Bergwerksbetreibers LKAB im Rahmen eines Testbetriebs eines modifizierten Ankerbohrwagens durchgeführt. Hierbei wurden SDA-Anker in Kombination mit einem pumpfähigen Zweikomponenten-Kunsthärz auf Silikathärzbasis installiert. Zusätzlich standen aus vorangegangenen untertägigen Messungen IR-Bilder mit Kunsthärzaustritt für diese Arbeit zur Verfügung. Diese wurden insbesondere zur Positionswahl und zum Aufbau des IR-Kamerasystems verwendet. Bei der Entstehung dieser Aufnahmen kam das gleiche Kunsthärzprodukt zum Einsatz wie in der Testmessung.

4.1 Aufbau des IR-Kamerasystems

Maßgeblich entscheidend für eine zuverlässige Kunsthärzerkennung ist die Positionierung des IR-Kamerasystems auf dem Ankerbohrwagen. Ausgehend davon erfolgt die Kameraauswahl. Daneben liegt aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen ein weiterer Fokus auf der Entwicklung eines geeigneten Gehäusekonzepts. Abschließend wird eine Möglichkeit zur benutzerfreundlichen Bildvisualisierung und -aufzeichnung mit Erweiterungsoptionen vorgestellt.

4.1.1 Positionierung auf dem Ankerbohrwagen

Im Folgenden werden zwei mögliche Positionen für das IR-Kamerasystem betrachtet, eine im hinteren Bereich des Ankerbohrwagens, auf oder in der Nähe der Fahrkabine, die andere im vorderen Bereich des Bohrrams. Vorteilhaft bei einer Anbringung auf oder in der Nähe der Fahrkabine ist, dass das System hierbei geschützter vor den anspruchsvollen Umgebungsbedingungen ist. Außerdem kann ein größerer Bereich der zu ankernden Strecke gleichzeitig erfasst werden. Nachteilig sind mögliche Sichteinschränkungen sowie Abstandsänderungen zum Prozess. Dagegen ermöglicht die Position im vorderen Bereich des Bohrrams eine weitestgehend ungestörte Sicht auf den zu setzenden Anker und seine unmittelbare Umgebung bei einem annähernd gleichbleibenden Abstand. Zudem kann eine höhere örtliche Auflösung des zu installierenden Ankers erzielt werden.

Während einer vorangegangenen Testinstallation im LKAB Testbergwerk Konsuln wurden Aufnahmen aus einer Position in Fahrkabinennähe erzeugt. Das Testbergwerk grenzt unmittelbar an den produktiven Betrieb des LKAB Eisenerzbergwerks Kiruna an. Die IR-Kamera diente dazu, eine Übersicht über die Ankerinstallation zu geben und wurde nicht explizit zur Überwachung des Kunstharzaustritts eingesetzt. Die visuelle Begutachtung der IR-Bilder ergab, dass unter bestimmten Bedingungen aus der hinteren Position Kunstharzaustritt beobachtet werden kann. Zum einen kann Kunstharz, das beim Austritt auf den Boden fällt, erkannt werden. Zum anderen kann um die Ankerplatte austretendes Kunstharz erfasst werden, wenn die Austrittsstelle nicht durch Maschinenteile verdeckt wird.

In Abbildung 4-1 ist ein während dieser Testinstallation aufgenommener Kunstharzinjektionsvorgang zu verschiedenen Zeitpunkten anhand von vier IR-Bildern in Falschfarben-Darstellung veranschaulicht. Untersucht wurde dabei die Intensität der emittierten Wärmestrahlung von Bohrhämmer, Hydraulikschlauch, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz. Dafür wurde für das jeweilige zu untersuchende Objekt ein Bildbereich (ROI, engl.: region of interest) mit einer Größe von 3 x 3 Pixel ausgewählt. Für diese ROIs wurde über die Graustufenwerte der einzelnen Pixel das arithmetische Mittel gebildet. Dieser Wert wird im Rahmen dieser Arbeit als Durchschnittswert bezeichnet. Die Positionen der objektbezogenen ROIs sind in Abbildung 4-1 in Bild 1 markiert. Der zeitliche Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts für die verschiedenen Objekte ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Das Loslassen des Ankers ist darin durch eine gestrichelte senkrechte Linie gekennzeichnet.

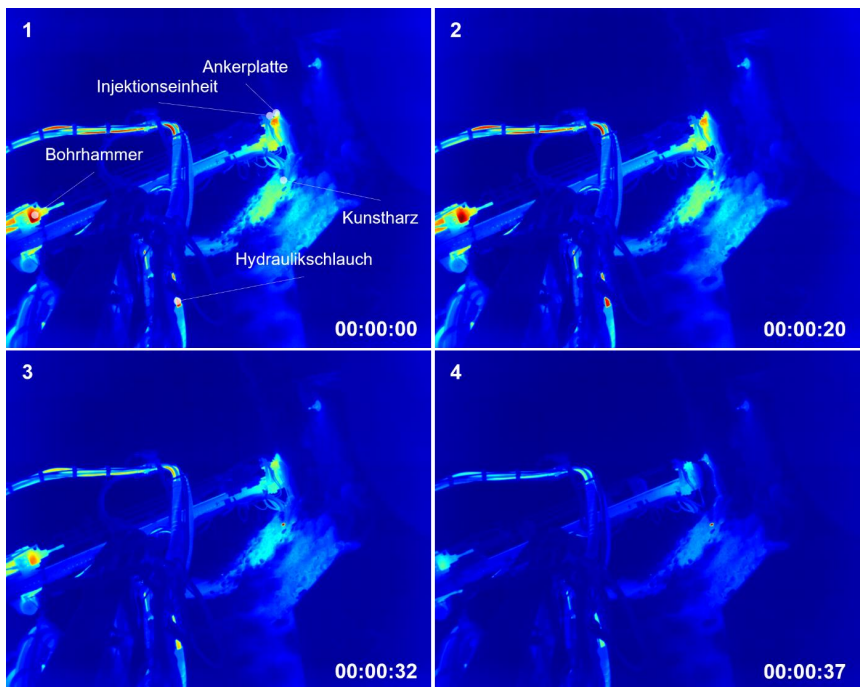


Abbildung 4-1: Verlauf der Kunstharzinjektion zu verschiedenen Zeitpunkten (Bild 1 bis 4) mit Positionsangabe der ROIs (3 x 3 Pixel) für Maschinenteile, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz, aufgenommen aus einer Kameraposition in Kabinennähe

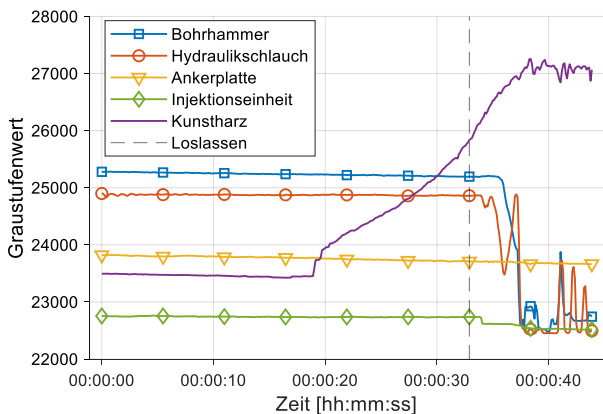


Abbildung 4-2: Zeitlicher Verlauf des Durchschnittswerts für Maschinenteile, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz innerhalb definierter ROIs (3 x 3 Pixel), aufgenommen aus einer Kameraposition in Kabinennähe

Der Injektionsbeginn ist in Bild 1 dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt weist die ROI für den Bohrhämmer den höchsten Durchschnittswert auf, gefolgt von der ROI für den Hydraulikschlauch (siehe Abbildung 4-2). In Bild 1 sind diese Bereiche des Bohrhammers und des Hydraulikschlauchs dunkelrot eingefärbt. In einem Zeitraum von ca. 18 s bis 20 s nach Injektionsbeginn ist in den IR-Bildern erkennbar, dass austretendes Kunstharz weiter nach unten auf den Boden fällt. Dies ist in Bild 2 gezeigt. In Abbildung 4-2 ist zu sehen, dass im selben Zeitraum der Durchschnittswert in der ROI für das Kunstharz am Boden beginnt anzusteigen, da das Kunstharzgemisch exotherm reagiert. Bei ca. 30 s überschreitet der Durchschnittswert des Kunstharzes den des Bohrhammers und steigt weiter an. Der Anstieg setzt sich nach dem Loslassen des Ankers noch ca. 6 s fort. Danach schwankt der Durchschnittswert bis zum Ende der Aufzeichnung in einem engen Wertebereich. Innerhalb weniger Sekunden, nachdem Kunstharz zu Boden fällt und somit sichtbar wird, ändert sich die Farbdarstellung in den IR-Bildern. In Bild 3 ist der Zeitpunkt unmittelbar vor dem Loslassen des Ankers dargestellt. Das am Boden liegende Kunstharz ist deutlich durch seine dunkelrote Färbung erkennbar, obwohl dieses nur einen sehr geringen Bildbereich einnimmt. Die Farbgebung des Bohrhammers und einzelner Hydraulikschläuche ändert sich über diesen kurzen Zeitraum von dunkelrot zu orangegelb. Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass die Durchschnittswerte für Bohrhämmer und Ankerplatte eine sinkende Tendenz haben. Daraus lässt sich schließen, dass sich diese Objekte abkühlen. Dies geschieht jedoch langsamer als die Erhöhung der Durchschnittswerte für das Kunstharz. Wie in Bild 4 zu sehen ist, wird der Bohrarm nach dem Loslassen des Ankers weg bewegt, sodass die angegebenen Durchschnittswerte für Bohrhämmer, Hydraulikschlauch und Injektionseinheit ab diesem Zeitpunkt ungültig sind. Des Weiteren ist in Bild 4 zu erkennen, dass ausgetretenes Kunstharz an der Ankerplatte sichtbar wird. Für das Kunstharz an der Ankerplatte können Graustufenwerte in der Größenordnung wie die Durchschnittswerte in der ROI für Bohrhämmer und Hydraulikschlauch festgestellt werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass aus einem Abstand von mehreren Metern und bei Anwesenheit weiterer Wärme emittierender Objekte im Sichtfeld (FOV, engl.: field of view) der Kamera ein Kunstharzaustritt erkennbar ist. Dabei zeigt sich, dass das ausgetretene Kunstharz auch höhere Graustufenwerte als andere Objekte erreichen kann. Jedoch ist infolge der Kamerapositionierung im hinteren Bereich die Sicht auf die zu installierenden Anker während der Kunstharzinjektion durch Maschinenteile eingeschränkt. Hinzu kommt, dass aufgrund der Kameraauswahl und des Abstands zu den Ankern der Anteil des relevanten Bildausschnitts am Vollbild gering ist.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass für eine sensorbasierte Kunstharzerkennung eine Position im vorderen Bereich des Bohrarms für das IR-Kamerasystem vorzuziehen ist. Durch den Einsatz geeigneter ROIs kann sichergestellt werden, dass kein Kunstharz an einem

anderen Anker, oder eine andere Wärmequelle im Bildbereich die Auswertung negativ beeinflussen (siehe Kapitel 4.3.3).

In Abbildung 4-3 ist der finale Aufbau für die Test- und die Validierungsmessung dargestellt. Das IR-Kamerasystem wurde auf einem Stahlbügel über der Bohrlafette angebracht, der zur Führung von Hydraulikschläuchen und Kabeln dient. Bei der Ausrichtung wurde darauf geachtet, dass diese nicht im Kamerabild liegen. Aufgrund der festen Verbindung zwischen dem Stahlbügel und dem Bohrraum ist auch der Abstand des IR-Kamerasystems zum Ankerprozess annähernd konstant. Lediglich der Blickwinkel auf die Ankerplatte und die Gesteinsoberfläche ändert sich in Abhängigkeit vom Anstellwinkel des Bohrraums in Bezug auf den Stoß bzw. die Firste. Ebenfalls ist in Abbildung 4-3 das Reinigungskonzept dargestellt, das in Kapitel 4.1.3 beschrieben wird.

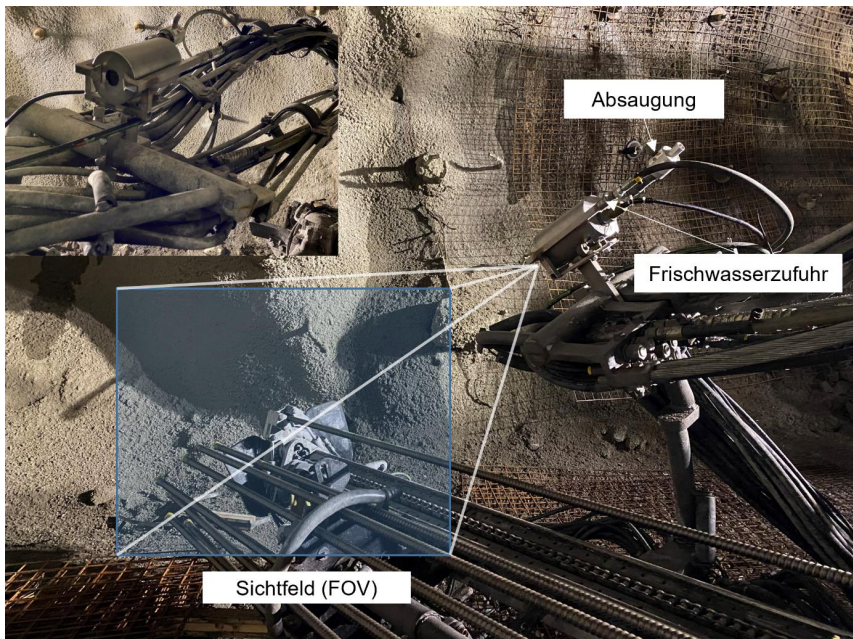


Abbildung 4-3: Positionierung des IR-Kamerasystems im vorderen Bereich des Bohrraums auf dem Ankerbohrwagen

Der Abstand zwischen dem IR-Kamerasystem und dem Ende der Bohrlafette betrug beim eingesetzten Ankerbohrwagen ungefähr zwei Meter. Bei der Positionierung des IR-Kamerasystems im vorderen Bereich des Bohrraums sind die applikationsspezifischen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Dies betrifft insbesondere Vibrationen, Wasser, Staub und Schmutz sowie Steinschlaggefahr. Das System ist diesen Einflüssen direkt und langanhaltend ausgesetzt, muss also entsprechend widerstandsfähig gestaltet sein.

Potenzielle Sichteinschränkungen im vorderen Bereich

Auch bei der Positionierung des IR-Kamerasystems im vorderen Bereich des Bohrarms kann gegebenenfalls die Sicht auf das austretende Kunstharz versperrt sein. In diesem Fall durch die Injektionseinheit und den Wandpuffer. Beispielhaft sind in Abbildung 4-4 IR-Bilder während eines Injektionsvorgangs mit Sichtbehinderung dargestellt. Zwar kann visuell ein Teil des austretenden Kunstharzes erkannt werden, mehrheitlich bleibt dieses jedoch verdeckt.

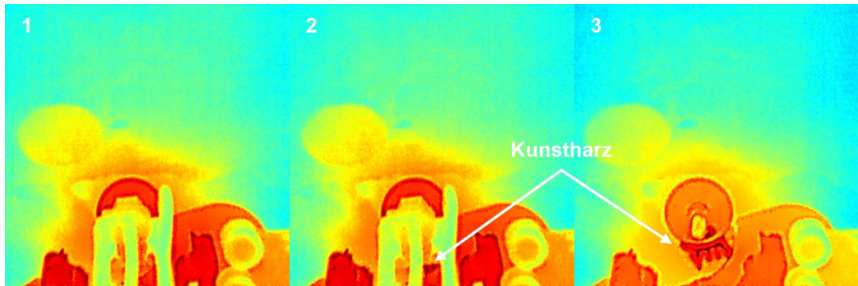


Abbildung 4-4: Sichtbehinderung durch Maschinenteile während einer Kunstharzinjektion mit Kunstharzaustritt, aufgenommen aus einer Position im vorderen Bereich des Bohrarms

Wie in Abbildung 4-5 zu sehen ist, liegt bei einer Ankerinstallation am linksseitigen Stoß der Wandpuffer oben und die IR-Kamera unten, sodass der Blick auf den zu installierenden Anker frei ist. Beim rechtsseitigen Stoß ist dies umgekehrt. Eine mögliche Lösung dieses Problems ist eine Konstruktion, die es ermöglicht die IR-Kamera mitzudrehen. Beispielsweise kann der gesamte Bohrarm, einzelne Teile davon oder die Kamerahalterung drehbar gestaltet werden.

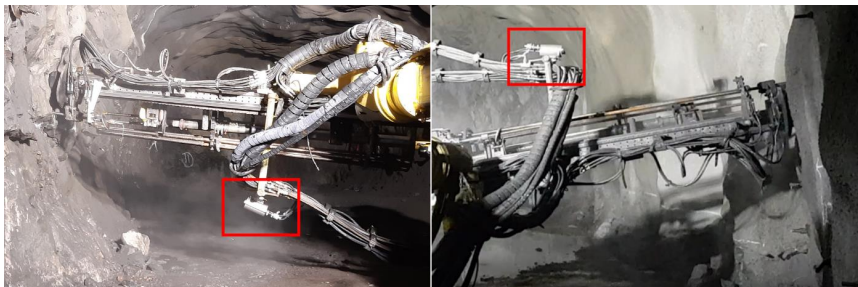


Abbildung 4-5: Kameraposition im vorderen Bereich des Bohrarms bei der Ankerinstallation am linksseitigen und rechtsseitigen Stoß

4.1.2 Kameraauswahl

Um die Übertragbarkeit des thermographischen Ansatzes demonstrieren zu können, wurden zwei IR-Kameras, die im langwelligen IR-Bereich arbeiten, ausgewählt. Aufgrund der Eignung für raue Umgebungsbedingungen in Kombination mit einem passenden Gehäuse, wurde für

das erste IR-Kamerasystem (Kamera 1) ein Tau2 Kamerakern der Firma FLIR eingesetzt. Die Basis für diese Entscheidung bildete eine von Berg [58] durchgeführte Marktrecherche zu und Evaluation von Kameras und Kamerakernen. Der Tau2 Kamerakern wird mit einem zusätzlichen Modul der Firma Workswell betrieben, das die Kamerasteuerung und Datenübertragung mittels des Open Source Frameworks Robot Operating System (ROS) ermöglicht. ROS bietet den Vorteil eines modularen Aufbaus. Dadurch wird eine schlanke Software ermöglicht und einzelne Komponenten können leicht kombiniert und erweitert werden. Zudem ist es kompatibel mit gängiger Hardware verschiedener Hersteller, wodurch ein hohes Maß an Flexibilität gegeben ist. Die Stromversorgung erfolgt über ein Ethernet-Kabel.

Für das zweite IR-Kamerasystem (Kamera 2) wurde ein Boson Kamerakern der Firma FLIR ausgewählt. Dabei handelt es sich um ein Nachfolgemodell des Tau2 Kamerakerns. Für den Kamerakern sind bereits ROS-Treiber verfügbar, sodass ein zusätzliches Modul entfällt. Der Betrieb des Boson Kamerakerns erfolgt über einen einfachen VPC-Adapter, wodurch das Gewicht der Kamera von 202 g auf 94 g reduziert wird. Über den VPC-Adapter mit USB2-Schnittstelle wird Stromversorgung, digitales Video und Kommunikation zum Kamerakern bereitgestellt [59]. Durch die geringeren Abmessungen ist der Einsatz eines kleineren Gehäuses möglich (siehe Kapitel 4.1.3). Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Tau2 Kamerakern mit Workswell Modul und der Boson Kamerakern mit VPC-Adapter sind in Abbildung 4-6 abgebildet.



Abbildung 4-6: Boson Kamerakern mit VPC-Adapter (links) und Tau2 Kamerakern mit Workswell Modul (rechts)

Der Tau2 Kamerakern und der Boson Kamerakern sind in verschiedenen Ausführungen erhältlich. Beide Kamerakern werden mit unterschiedlicher Auflösung, thermischer Empfindlichkeit und Bildrate angeboten. Dabei können je nach ausgewähltem Objektiv das Gewicht,

die Abmessungen und die Blendenzahl variieren. In Tabelle 4-1 sind die Spezifikationen der ausgewählten Kamerakerne mit dem jeweiligen Objektiv angegeben. Beide Kamerakerne verfügen über einen ungekühlten VO_x -Mikrobolometer-Detektor und eine Auflösung von 640×512 Pixel. Verglichen mit dem Tau2 Kamerakern, hat der Boson Kamerakern eine geringere Pixelgröße von $12 \mu\text{m}$, dafür aber eine größere Blendenöffnung mit einer Blendenzahl von $f/1.0$. Die Vorgehensweise bei der Auswahl der Objektive wird in diesem Kapitel weiter unten behandelt.

Die thermische Empfindlichkeit wird über die rauschäquivalente Temperaturdifferenz (NETD, engl.: noise equivalent temperature difference) definiert. Der NETD-Wert ist ein Maß für die Temporauflösung eines Detektors. Je niedriger der NETD-Wert ist, desto größer ist die kleinste auflösbare Temperaturdifferenz und damit die thermische Empfindlichkeit eines Detektors. [42, 52] Der Tau2 Kamerakern lag in der Variante mit der höchsten thermischen Empfindlichkeit vor ($< 30 \text{ mK}$). Aus Kostengründen wurde ein Boson Kamerakern mit mittlerer thermischer Empfindlichkeit ($< 50 \text{ mK}$) ausgewählt. Dadurch kann überprüft werden, ob eine Reduktion der thermischen Empfindlichkeit sich negativ auf die Kunstharzerkennung auswirkt.

Aufgrund der anspruchsvollen Umgebungsbedingungen ist eine grundsätzliche Robustheit der Kamerakerne notwendig. Durch den Einsatz von Schutzgehäusen können diese vor schädlichen Einflüssen, wie Steinfall oder Staub- und Wassereinwirkungen, geschützt und die Robustheit zusätzlich gesteigert werden. Die beiden Kamerakerne können über einen großen Temperaturbereich von -40°C bis 80°C und bei einer relativen Luftfeuchtigkeit $> 90 \%$ betrieben werden. Angemerkt sei, dass für die verwendete industrielle Version des Workswell Moduls ein kleinerer Betriebstemperaturbereich von -40°C bis 60°C angegeben wird [60]. Während des Ankerbohr- und -setzprozesses treten mechanische Schocks und Vibrationen auf. Die in Tabelle 4-1 angegebenen Schock- und Vibrationsfestigkeiten sind die vom Hersteller maximal geprüften Werte. Bei der Konstruktion eines Schutzgehäuses für den dauerhaften industriellen Einsatz sollte die Notwendigkeit einer Schwingungsdämpfung überprüft werden.

Tabelle 4-1: Technische Daten der eingesetzten Kamerakerne mit Objektiv [59–65]

Eigenschaften	Spezifikation	
	Tau2 (9 mm)	Boson (8,7 mm)
Kameradetektor	Ungekühlter VO _x -Mikrobolometer	Ungekühlter VO _x -Mikrobolometer
Auflösung	640 x 512	640 x 512
Pixelgröße	17 µm	12 µm
Spektralbereich	7,5 µm bis 13,5 µm	8 µm bis 14 µm
Betriebstemperatur	-40 °C bis 80 °C	-40 °C bis 80 °C
Rel. Luftfeuchtigkeit	95 %, nicht kondensierend	93 %, nicht kondensierend
Schockfestigkeit	500g, 0,8 ms	1500g, 0,5 ms
Vibrationsfestigkeit	4,3 G _{rms}	4,3 G _{rms}
FOV (Horizontal x Vertikal)	69° x 56°	50° x 40°
Blendenzahl	f/1,4	f/1,0
Thermische Empfindlichkeit (NETD)	< 30 mK	< 50 mK
Bildrate	< 9 Hz	< 9 Hz
Abmessungen (Breite x Höhe x Tiefe)	44 mm x 44 mm x 49 mm ¹ 47 mm x 46 mm x 86 mm ²	32 mm x 36 mm x 46 mm ¹ 32 mm x 36 mm x 57 mm ³
Gewicht	72 g ¹ /202 g ²	68 g ¹ /94 g ³

¹ Kamerakern + Objektiv² mit Workswell Modul³ mit VPC-Adapter

Die Wahl des Objektivs muss applikationsspezifisch erfolgen, da es das Sichtfeld der Kamera bestimmt. Somit ist es ein zentraler Einflussfaktor zur erfolgreichen Kunstharzerkennung. Die Kamerakerne Tau2 und Boson werden mit verschiedenen Objektiven angeboten. Bei der Objektivwahl wird einerseits die Notwendigkeit, das Kunstharz unmittelbar nach dem Austritt zu erfassen und andererseits das Bedürfnis nach einem möglichst großen Sichtfeld zu Überwachungszwecken berücksichtigt. Zum Vergleich sind in Abbildung 4-7 jeweils ein IR-Bild beim Ankerbohrprozess, aufgenommen mit einem Tau2 Kamerakern und 7,5 mm sowie 13 mm Objektiv, gegenübergestellt. Beim gleichen Abstand bietet das 7,5 mm Objektiv ein größeres

Sichtfeld, sodass z. B. weitere installierte Anker und Überlagerungen von Maschendraht im Bild zu sehen sind. Dagegen bietet das 13 mm Objektiv eine detailliertere Sicht auf den zu installierenden Anker.

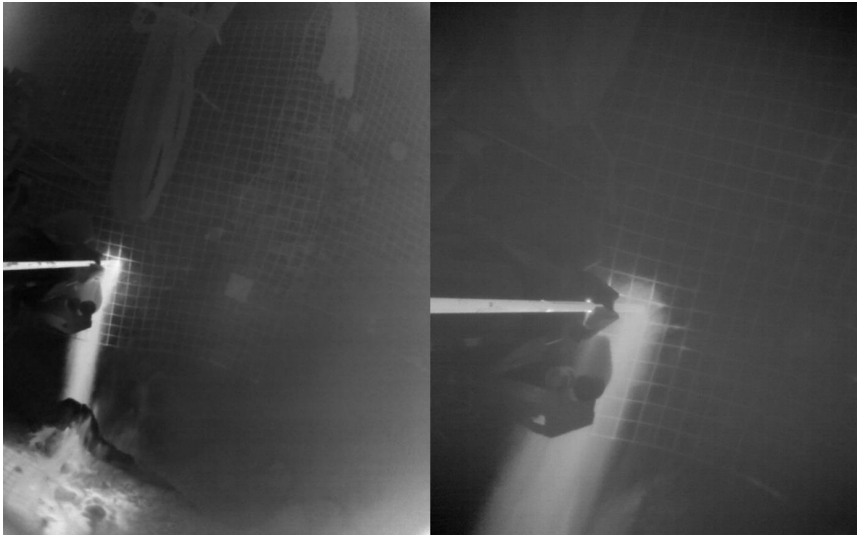


Abbildung 4-7: IR-Bilder während des Ankerbohrprozesses, aufgenommen mit einem Tau2 Kamerasen und 7,5 mm Objektiv (links) sowie 13 mm Objektiv (rechts)

Für eine zuverlässige Erkennung müssen auch geringe Mengen Kunstharz rechtzeitig erkannt werden. Beim Austritt von Kunstharz variieren Position, Menge und Gestalt (siehe Abbildung 3-7). Dazu kommt, dass sich aufgrund der hohen Reaktionsgeschwindigkeit der beiden Kunstharzkomponenten die Kunstharztemperatur und damit auch die emittierte IR-Strahlung schnell lokal verändert. Eine präzise Messung ist für eine schnelle Erkennung entscheidend. Aus diesem Grund wird im Folgenden das Punktgrößenverhältnis betrachtet.

Das Punktgrößenverhältnis gibt an, aus welchem Abstand zu einem Messobjekt definierter Größe eine präzise Temperaturmessung noch möglich ist. Das momentane Sichtfeld (IFOV, engl.: instantaneous field of view) ist der Bildbereich, der aus einem definierten Abstand von einem einzelnen Detektorelement gemessen werden kann. Für eine genaue Messung wird der Messwert eines einzelnen Detektorelements als nicht ausreichend angesehen. Beispielsweise kann ein defekter Pixel einen falschen Messwert liefern oder Reflexionen am Messobjekt können einen zu hohen Messwert verursachen. Zudem entspricht die quadratische Pixelform nicht immer der zu messenden Objektform. Die Genauigkeit einer Messung vergrößert sich, je mehr Detektorelemente des Kameradetektors auf das Messobjekt gerichtet sind. Um präzise Messwerte zu erzielen, wird von Kameraherstellern empfohlen einen mindestens 3 x 3 Pixel großen

Messbereich auszuwählen. Die kleinste präzise messbare Objektgröße beträgt dann das Dreifache des IFOV-Werts. [66]

Für die Berechnung der IFOV-Werte werden die folgenden Formeln verwendet [43, 66]:

$$IFOV(mrad) = \frac{\text{Pixelgröße}}{\text{Brennweite}} \quad (4-1)$$

$$IFOV(mrad) = \frac{FOV}{\text{Auflösung}} \cdot 17,44 \quad (4-2)$$

$$IFOV(mm) = IFOV(mrad) \cdot \text{Messentfernung}(m) \quad (4-3)$$

Bezogen auf die Kunstharzerkennung besteht bei einem zu großen IFOV-Wert die Gefahr, dass neben Kunstharz auch die kältere Umgebung miterfasst wird und dadurch zu niedrige Messwerte ausgegeben werden. In Tabelle 4-2 sind für beide Kamerakerne die berechneten IFOV-Werte mehrerer Objektive für eine Entfernung von 2 m zum Messobjekt aufgeführt. Dies entspricht dem Abstand bei einer Positionierung auf dem Bohrraum.

Gemäß Formel (4-4) erfolgt die Berechnung der Größe der Messszene L anhand des FOVs und des Abstands R der Messszene zur Optik. Bei einem nicht quadratischen Detektor wird die Größe der Messszene in horizontaler (HFOV) und vertikaler Richtung (VFOV) berechnet. [52]

$$L = 2 \cdot R \cdot \tan \frac{FOV}{2} \quad (4-4)$$

Für den Tau2 Kamerakern wird ein 9 mm Objektiv mit einem FOV von 69° x 56° ausgewählt. Damit kann aus einem Abstand von 2 m ein Messobjekt mit einer Größe von 11,3 mm (3 x IFOV) in einem Bereich von 2,7 m x 2,1 m erfasst und präzise gemessen werden.

Für den Boson Kamerakern standen unterschiedliche Objektive zur Auswahl. Für die vorliegende Anwendung waren die Objektive mit einem horizontalen Sichtfeld von 95° (4,9 mm Brennweite) und 50° (8,7 mm Brennweite) besonders relevant. Mit dem 4,9 mm Brennweite kann zwar ein größerer Messbereich erfasst werden, jedoch muss das zu erfassende Messobjekt für eine präzise Messung größer sein und es treten größere Verzeichnungen auf. So wird die Größe der möglichen Verzeichnungen für den Boson Kamerakern mit einer Brennweite von 4,9 mm mit < 50 % und bei 8,7 mm mit < 11 % angegeben [59]. Zwar wird allgemein ein größeres Sichtfeld als positiv angesehen, da im Rahmen dieser Arbeit der Fokus jedoch auf einer zuverlässigen Kunstharzerkennung liegt, wird für den Boson Kamerakern ein Objektiv mit einer Brennweite von 8,7 mm und einem FOV von 50° x 40° ausgewählt. Damit ist eine präzise Messung eines Objektes bereits ab einer Größe von 8,2 mm möglich. Die Messszene umfasst dabei 1,87 m x 1,46 m. In Tabelle 4-2 sind die IFOV- und FOV-Werte der unterschied-

lichen Objektive für den Boson und den Tau2 Kamerakern gegenübergestellt. Ein Boson Kamerakern mit einem 8,7 mm Objektiv weist dabei ähnliche Werte auf wie ein Tau2 Kamerakern mit einem 13 mm Objektiv.

Für eine ausschließliche Nutzung des IR-Kamerasystems für die Kunstharzerkennung kann eine längere Brennweite als besser geeignet angesehen werden. Das Potenzial der Verbesserung durch eine weitere Verringerung des IFOV ist jedoch begrenzt. Demgegenüber ermöglicht die Wahl der weiter oben genannten Objektive die Erfassung eines größeren Bildbereichs und somit eine Überwachung des Ankerbohr- und -setzprozesses. Dadurch können in ein solches System weitere Funktionen integriert werden. Eine Befragung des Bedienpersonals ergab ebenfalls, dass ein größeres Sichtfeld als vorteilhaft empfunden wird. Dementsprechend ist es sinnvoll, die kürzeste Brennweite zu wählen bei der die Anforderungen an eine zuverlässige Kunstharzerkennung sicher erfüllt werden.

Tabelle 4-2: Berechnete IFOV-Werte sowie horizontales und vertikales Sichtfeld verschiedener Kameraobjektive für eine Entfernung von 2 m zum Messobjekt gemäß Formel (4-1) bis (4-4)

Kamerakern (HFOV x VFOV)	IFOV	3 x IFOV	HFOV	VFOV
Tau2 (7,5 mm) 90° x 69°	4,9 mm	14,7 mm	4,00 m	2,75 m
Tau2 (9 mm) 69° x 56°	3,8 mm	11,3 mm	2,75 m	2,13 m
Tau2 (13 mm) 45° x 37°	2,5 mm	7,4 mm	1,66 m	1,34 m
Boson (4,9 mm) 95° x 77°	5,2 mm	15,5 mm	4,37 m	3,18 m
Boson (8,7 mm) 50° x 40°	2,7 mm	8,2 mm	1,87 m	1,46 m

4.1.3 Gehäusekonzept

Bedingt durch die exponierte Position auf dem Bohrarm des Ankerbohrwagens ist gemäß den Anforderungen aus Kapitel 2.4 der Einsatz eines kompakten und robusten Gehäuses für eine gute Integrierbarkeit erforderlich. Ein solches Gehäuse, das die definierten Anforderungen erfüllt, war zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht als Standardprodukt auf dem Markt verfügbar. Um für das IR-Kamerasystem eine gute Sicht auf den Prozess zu gewährleisten, lag bei der Konzeptionierung des Gehäuses ein besonderes Augenmerk auf der Sauberkeit des Germaniumfensters. Dazu wurden sowohl konstruktive Details des Öffnungsfensters als auch zusätzliche Maßnahmen zur Reinigung mit einbezogen. Die iterative Anpassung des Gehäusedesigns und des Reinigungskonzepts erfolgte unter Einbezug der Ergebnisse aus den Versuchen in den Einrichtungen des Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen University sowie unter Tage. Die Konstruktion und die Fertigung wurden auf Basis der definierten Vorgaben aus diesem Konzept extern beauftragt.

Angesichts der Kameraposition auf dem Bohrarm war ein wichtiger Aspekt die Gehäusebauhöhe. Bei der Ankerinstallation im unteren Stoßbereich ist der Abstand zwischen Stahlbügel und Sohle gering. Zusätzlich sollte die Option bestehen, das System an der gegenüberliegenden Seite des Stahlbügels zu befestigen ohne den Prozess zu behindern. Um die Kollisionsgefahr mit Maschinenteilen und Umgebung zu minimieren, fiel die Wahl auf eine zylindrische Gehäuseform. Das erste Gehäuse hat eine Länge von ca. 201 mm (ohne Steckverbindung) und einen Durchmesser von 114 mm (ohne Sockel). Da die zweite Kamera kleiner ist, konnte das zweite Gehäuse gegenüber dem ersten Gehäuse um ca. 41 mm gekürzt und um ca. 17 mm im Durchmesser verkleinert werden. Dadurch ist das zweite Gehäuse kompakter, wodurch die Flexibilität bei der Positionierung zusätzlich gesteigert wird. In Abbildung 4-8 sind die zwei Gehäuse mit den eingebauten Kameramodellen abgebildet. Im Wesentlichen bestehen beide Gehäuse jeweils aus einem Abschlussdeckel mit Kamerahalterung und einem Gehäusezylinder mit Frontdeckel. Die Gehäuse sind aus Edelstahl gefertigt, um eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Belastung und Korrosion zu bieten. Durch den Einsatz von Dichtungsringen sind die Gehäuse wasser- und staubdicht geschlossen.

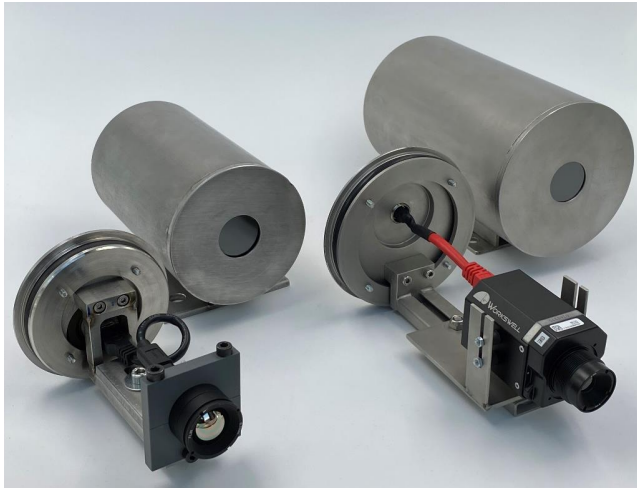


Abbildung 4-8: Gehäusekonzept für Kamera 2 (links) und Kamera 1 (rechts)

Im Weiteren werden die Gehäusekomponenten sowie das Reinigungskonzept detailliert beschrieben.

Abschlussdeckel mit Kamerahalterung

Im Abschlussdeckel befindet sich ein staub- und wasserdichter Industrie-Steckverbinder für die Datenübertragung und Stromversorgung. Bei den eingesetzten Kameramodellen wurden unterschiedliche Steckverbindungen eingesetzt, da sich die Schnittstellen unterscheiden. Der

Abschlussdeckel mit Kamerahalterung ist rotationsfähig. Der innere Teil des Abschlussdeckels wird mit dem Äußeren verschraubt, sodass der dazwischenliegende O-Ring über den Anpressdruck nach außen abdichtet. Auf der Kamerahalterung kann die Kamera sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung verschoben werden. Die mechanische Anbindung der Kamera erfolgt mittels Schrauben mit Gummipuffern. Im Gegensatz zum Tau2 Kamerakern mit Workswell Modul (Kamera 1), verfügt der Boson Kamerakern (Kamera 2) über keine geeigneten Bohrungen zur Verschraubung mit dem Gehäuse. Folglich wird dieser mit einer Montagevorrichtung fixiert. Die Notwendigkeit zur vertikalen Justage entfällt dadurch.

Gehäusezylinder mit Frontdeckel

Der Gehäusezylinder ist mit dem Frontdeckel verschweißt, um keine Eintrittsmöglichkeiten für Wasser und Staub zu bieten. Im Frontdeckel befindet sich eine kreisförmige Öffnung, in die ein Germaniumfenster eingesetzt wird. Das Germaniumfenster wird mit zwei O-Ringen abgedichtet und von innen mit einem Vorschraubring montiert. Diese Konstruktion ermöglicht einen annähernd ebenen Übergang zwischen Germaniumfenster und Frontdeckel. Damit sollen Ansammlungen von Wasser und Schmutz vermieden und eine einfache Reinigung ermöglicht werden, um das Sichtfeld der Kamera freizuhalten.

Reinigungskonzept

Um negative Auswirkungen von Verschmutzungen auf die Bildqualität zu minimieren, muss das Germaniumfenster sauber gehalten werden. In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass durch den Einsatz verschiedener Luftdüsen oder Windvorhänge keine ausreichende Schutzwirkung erzielt werden konnte. Wie in Abbildung 4-9 zu sehen ist, kann im ungünstigsten Fall beim Versuch einer direkten Reinigung des Germaniumfensters mittels Druckluft sogar eine Beschädigung eintreten. Daher wurde ein materialschonenderes Reinigungskonzept entwickelt.



Abbildung 4-9: Beschädigung der DLC-Beschichtung eines Germaniumfensters durch direkte Drucklufteinwirkung, aufgenommen mittels Lichtmikroskop

Das Reinigungskonzept besteht aus einer kombinierten Frischwasserzugabe und Absaugung. Die Spülung mit Frischwasser dient zur gründlichen Reinigung der Oberfläche und soll den Verschleiß des Germaniumfensters minimieren, indem der Kontakt mit Partikeln beim Abtransport reduziert wird. Die Absaugung soll sicherstellen, dass sich keine Verschmutzungen auf dem Germaniumfenster ansammeln können.

Die Prüfung der Machbarkeit des Reinigungskonzepts erfolgte innerhalb der Einrichtungen des AMTs. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-10 abgebildet. Ein rechteckiges Gehäuse wurde verwendet, da sich das in dieser Arbeit entwickelte Gehäuse zu diesem Zeitpunkt noch in der Konzeptphase befand. Der Durchmesser der Fensteröffnung war mit dem im finalen Gehäusedesign identisch. Erschwerend für die Reinigung des Sichtfelds war, dass beim rechteckigen Gehäuse die Fase in der Fensteröffnung um einige Millimeter höher war. Zudem war davor ein Schutzgitter angebracht. Eine Stunde lang wurde wiederholend ein Wasser-Sand-Gemisch auf das Germaniumfenster aufgegeben. Die Reinigung erfolgte durch Absaugung mittels eines Nass-Trockensaugers bei konstanter Saugkraft und manueller Zugabe von Frischwasser.

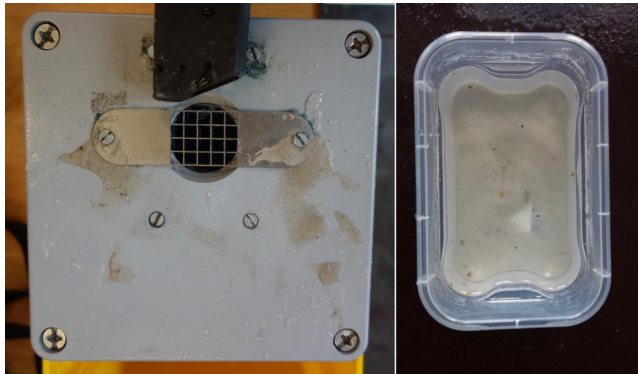


Abbildung 4-10: Machbarkeitsprüfung des Reinigungskonzepts (links), Wasser-Sand-Gemisch (rechts)

Zu Beginn und nach Beendigung des Versuchs wurde der Zustand des eingesetzten Germaniumfensters mit einem Referenzfenster visuell verglichen. Dabei konnte kein Verschleiß oder Beschädigungen am eingesetzten Germaniumfenster festgestellt werden. Auch mit hoher Faser und Schutzgitter konnte das Germaniumfenster mit dem Reinigungskonzept gesäubert und somit die Machbarkeit demonstriert werden. Der finale Reinigungsaufsatz wurde mit dem zylindrischen Gehäuse nach dessen Fertigstellung in den internen Einrichtungen erfolgreich überprüft.

In Abbildung 4-3 ist der finale Reinigungsaufsatz zusammen mit dem Gehäuse auf dem Ankerbohrwagen zu sehen. Von einer Seite wird mit geringem Druck Frischwasser auf das Germaniumfenster aufgegeben. Die Verschmutzungen werden durch Absaugung von der gegenüberliegenden Seite abtransportiert. Die Absaugung erfolgt mittels eines Luftstromverstärkers, auch als Venturi-Düse bezeichnet, die mit Druckluft betrieben wird. Dabei wird der Luftvolumenstrom um ein Vielfaches des Druckluftverbrauchs verstärkt [67]. Venturi-Düsen besitzen keine beweglichen Teile, wodurch sie bei sachgemäßem Einsatz als wartungsfrei angesehen werden können [67]. Dies ist vorteilhaft für den Einsatz in rauen Umgebungen. Zudem verfügen Ankerbohrwagen in der Regel über einen Druckluftanschluss, der für den Betrieb der Absaugung genutzt werden kann. Die Saugleistung und der Wasserdruck müssen aufeinander abgestimmt werden, um ein gutes Reinigungsergebnis und minimierten Verschleiß zu gewährleisten.

4.1.4 Datenaufnahme

Damit sich die bedienende Person auf ihre eigentliche Aufgabe, die Ankerinstallation, fokussieren kann, wurde eine übersichtliche und benutzerfreundliche Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Bildvisualisierung und -aufzeichnung gestaltet. In Abbildung 4-11 sind die Bestandteile der Mensch-Maschine-Schnittstelle schematisch dargestellt. Diese umfasst die Kontrollbox mit LED-Statusanzeige für Kameraverbindung, Bildaufzeichnung und Festplattenspeicher. Dabei können bis zu zwei IR-Kameras an die Kontrollbox angeschlossen werden. Der Touchscreen-Monitor mit grafischer Benutzeroberfläche (GUI, engl.: graphical user interface) dient der Bildvisualisierung. Für die Ansteuerung der IR-Kameras und die Aufzeichnung von Bilddaten wird ROS verwendet.



Abbildung 4-11: Schematische Übersicht über die Bestandteile (links: Kontrollbox, Mitte: Touchscreen-Monitor, rechts: IR-Kamera)

Durch das Einschalten des Netzschalters wird der Rechner in der Kontrollbox hochgefahren. Nach der Betätigung des Login-Buttons am Touchscreen-Monitor starten die IR-Kameras und die Bildaufnahme automatisch. Ein Aufblinken der grünen Kamera LEDs zeigt an, dass eine Verbindung zu den IR-Kameras besteht. Nach ca. einer Minute leuchten die LEDs dauerhaft. Das heißt die Bildaufzeichnung läuft und die Kamerabilder können in der GUI angezeigt werden. Die GUI für die Bildvisualisierung wurde unter Verwendung der Programmbibliothek Qt entwickelt. Nach dem Start öffnet sich die GUI auf dem Touchscreen-Monitor und zeigt eine Live-Kameraübertragung. Gleichzeitig werden die Bilddaten auf einer externen Festplatte in der Kontrollbox gespeichert. Eine rote LED zeigt durch ein Aufblinken an, wenn der Speicherplatz ein kritisches Niveau erreicht hat. Die Festplatte verfügt dann noch über ausreichend Speicherplatz, um eine Schicht zu beenden und muss anschließend gewechselt werden. Das Herunterfahren des Systems erfolgt über den Monitor oder den Drucktaster „Aus“.

Zum Zeitpunkt der Arbeit standen in der GUI für die Bildvisualisierung die Funktionen Starten und Stoppen sowie die Snapshot-Funktion zur Verfügung. Die Snapshot-Funktion dient der Speicherung einzelner Kamerabilder. Die GUI ist so konzipiert, dass bei Bedarf weitere IR-Kameras oder andere Sensoren sowie Funktionalitäten, wie bspw. die Anzeige des Graustufenbildes als Falschfarben- oder Kantenbild, leicht integriert werden können.

4.2 Laboruntersuchungen zum Einfluss der Umgebungstemperatur

Das IR-Kamerasystem muss über einen weiten Temperaturbereich einsetzbar sein, um die gestellten Anforderungen an die Integrierbarkeit erfüllen zu können. Dies wird hardwareseitig durch die Wahl der in Tabelle 4-1 genannten Kamerakerne sichergestellt, die für den Einsatz über einen großen Betriebstemperaturbereich ausgelegt sind. In diesem Kapitel wird untersucht, wie sich die Temperatur des Kamerakerns und die Graustufenwerte in den IR-Bildern bei einem Kamerabetrieb von mehreren Stunden sowie bei verschiedenen Umgebungstemperaturen entwickeln. Für die Untersuchungen wird der Boson Kamerakern verwendet, da dieser aufgrund seiner geringeren Abmessungen für einen zukünftigen Einsatz dem Vorgängermodell vorzuziehen ist.

4.2.1 Versuchsaufbau¹

Die Messungen wurden in einer Klimakammer des Modells DY200 der Firma ACS durchgeführt. Die Messgenauigkeit ist mit $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgewiesen [68]. Die Klimakammer

¹ Dieses Kapitel nimmt Bezug auf die Masterarbeit von Stephane Kellian Nde Talla: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Bildqualität eines Infrarotkamarasystems in Hinblick auf den Einsatz im untertägigen Ankerbohr- und Setzprozess. Angefertigt am 08.09.2021 am Institute for Advanced Mining Technologies, RWTH Aachen University. Betreuende Professorin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen, Wissenschaftliche Betreuerin: Violetta Storoschewich M. Sc. RWTH

ermöglicht die Realisierung verschiedener Umgebungstemperaturen unter definierten Bedingungen. Eine Wärmeübertragung zwischen dem Inneren der Klimakammer und der Umgebung wird unterbunden. In Abbildung 4-12 ist der Messaufbau in der Klimakammer dargestellt. Das Schutzgehäuse mit dem Boson Kamerakern wurde auf einer Halterung befestigt. Die Halterung war horizontal und vertikal verstellbar. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Messszene zentral im Sichtfeld der Kamera lag. Die Messszene bestand aus einer Betonplatte und einer runden Ankerplatte. Die 400 mm x 400 mm x 50 mm große Betonplatte stellte die Gesteins- bzw. Spritzbetonoberfläche unter Tage dar. Die Ankerplatte mit einem Durchmesser von ca. 150 mm ist identisch mit den während der untertägigen Messungen verwendeten Ankerplatten. Der Abstand zwischen dem Frontdeckel des Kameragehäuses und der Betonplatte betrug ca. 335 mm. Der Innenraum der Klimakammer ist aus Edelstahl gefertigt. Die glänzenden Edelstahloberflächen haben einen hohen Reflexionsgrad. Um unerwünschten Strahlungseintrag zu unterbinden, wurde der Innenraum mit Pappmaterial ausgekleidet, das einen geringen Reflexionsgrad aufweist. Die relative Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer wurde gemessen und nicht voreingestellt. Zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit wurde ein Hygrometer des Modells GFTB 200 mit einer Messgenauigkeit von $\pm 2,5 \%$ verwendet [69]. Ein Kontaktthermometer des Typs Voltkraft DT-300 wurde auf der Betonplatte zur Messung der Oberflächentemperatur angebracht. Die Messgenauigkeit ist mit $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ angegeben [70].

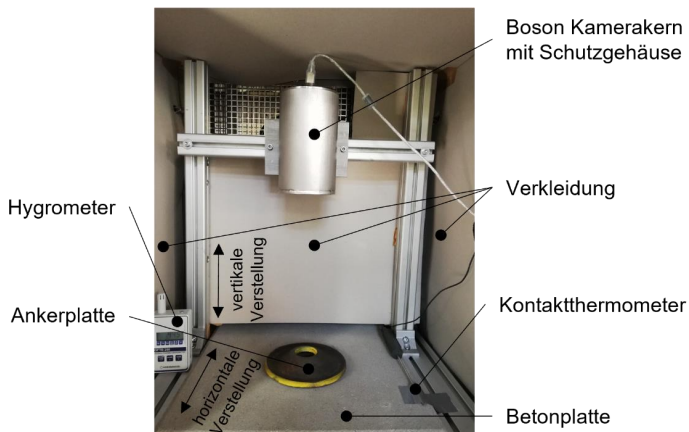


Abbildung 4-12: Messaufbau in der Klimakammer

Über ein Bedienpanel an der Klimakammer wurde die gewünschte Umgebungstemperatur (Soll-Temperatur) sowie die Temperaturänderungsrate eingestellt. Nachdem an der Betonplatte sich die Temperatur auf den Sollwert stabilisierte, wurde weitere 30 min bis zum Starten der Kamera gewartet. Die Wartezeit sollte sicherstellen, dass alle Komponenten des Messaufbaus die voreingestellte Temperatur angenommen haben. Unmittelbar nachdem die Kamera

gestartet wurde, wurden über die GUI des Kameraherstellers Bilddaten aufgenommen und gespeichert. Die Temperaturen des FPAs und des Signalverarbeitungsprozessors wurden über Temperatursensoren im Kamerainneren gemessen, in der GUI ausgegeben und minutlich aufgezeichnet.

Zum Schutz des Kamerakerns vor irreparablen Schäden soll laut Hersteller die Temperatur des Signalverarbeitungsprozessors einen Wert von 105 °C (Werkseinstellung) nicht erreichen. Ansonsten schaltet die Kamera nach 10 s in den Energiesparmodus, um die Temperatur wieder abzusenken. In diesem Modus kann die Kamera zwar angesteuert werden, sendet jedoch keine Bilddaten mehr. [59] Um eine unterbrechungsfreie Bildwiedergabe sicherzustellen, muss die Temperatur des Signalverarbeitungsprozessors immer unterhalb des maximalen zulässigen Werts von 105 °C liegen.

Bei Voruntersuchungen in der Klimakammer wurde die relative Luftfeuchtigkeit auf zwei unterschiedliche Werte eingestellt. Dabei konnten keine Auffälligkeiten der Temperatur des FPAs für den Boson Kamerakern festgestellt werden. Bei gleicher Umgebungstemperatur war die Temperatur des FPAs bei 20 % und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit annähernd gleich. Allerdings zeigte sich, dass die aktivierte Luftbefeuchtung die Szenendarstellung in den IR-Bildern beeinflusst. Daher wurde für die weiterführenden Untersuchungen die Luftbefeuchtung deaktiviert und die relative Luftfeuchtigkeit gemessen.

4.2.2 Kamerabetrieb über mehrere Stunden

Für die Kunstharzerkennung ist es erforderlich, dass das Sensorsystem auch über mehrere Stunden betrieben werden kann. Aus diesem Grund wurde untersucht, wie ein mehrstündiger Betrieb die Temperatur des FPAs und des Signalverarbeitungsprozessors sowie die Entwicklung der Graustufenwerte beeinflusst. Die Umgebungstemperatur in der Klimakammer wurde auf 20 °C eingestellt. Die Messdauer betrug mehr als 6 Stunden. Die gemessene relative Luftfeuchtigkeit lag zwischen 31 % und 33 %.

In Abbildung 4-13 (unten) ist die Temperaturentwicklung für den FPA und den Signalverarbeitungsprozessor sowie die Graustufenwertentwicklung für ausgewählte ROIs der Messszene dargestellt. Zu Beginn liegt die Temperatur des FPAs mit 25,1 °C etwa 5 °C über der eingestellten Umgebungstemperatur von 20 °C. Die Temperatur des FPAs steigt zu Beginn schnell an und liegt 5 min nach dem Starten der Kamera bei ca. 33 °C. Dies entspricht einem Anstieg um 8 °C. Danach verlangsamt sich der Temperaturanstieg. So beträgt die Temperatursteigerung nach weiteren 5 min nur ca. 2 °C. Während der Messdauer stellt sich eine konstante Temperatur für den FPA ein, diese liegt mit 40,6 °C etwa 20 °C oberhalb der eingestellten Umgebungstemperatur. Ebenfalls steigt die Temperatur des Signalverarbeitungsprozessors nach dem Kamerastart stark an. Zu Beginn liegt diese bei ca. 33 °C und steigt innerhalb von 5 min um ca. 7 °C auf ca. 40 °C. Nach weiteren 5 min beträgt der Temperaturanstieg nur

ca. 2 °C. Nach etwa einer Stunde stellt sich ein thermisches Gleichgewicht ein. Die Temperatur schwankt in einem Bereich von 45,5 °C bis 48,2 °C um einen Mittelwert von 46,9 °C und somit unterhalb der zugelassenen Maximaltemperatur von 105 °C.

Als Nächstes wird untersucht, wie sich die Graustufenwerte innerhalb der Messszene über die Messdauer entwickeln. Dafür wird jedes 8. Bild aus der Messung betrachtet. Bei der verwendeten Bildrate von 8 Bildern pro Sekunde entspricht dies einem Zeitabstand von 1 s. Bezogen auf die Mitte der Ankerplatte werden die IR-Bilder in 4 Bereiche aufgeteilt. Für jeden Bereich wird jeweils eine ROI auf der Anker- und Betonplatte gewählt. Die Ankerplatte weist mittig eine Aussparung auf. In der Aussparung der Ankerplatte wird ebenfalls eine ROI gewählt, die sich auf der Betonplatte befindet. Diese ROI wird als Beton_Mitte bezeichnet. In Abbildung 4-13 (oben) sind die Positionen der ROIs in einem IR-Bild der Messszene gekennzeichnet. Insgesamt werden 9 ROIs verwendet. Die ROIs sind 20 x 20 Pixel groß. Anschließend wird für jede ROI ein durchschnittlicher Graustufenwert berechnet.

Die durchschnittlichen Graustufenwerte für die ROIs auf Beton- und Ankerplatte liegen nahe zusammen und die Werteentwicklung ist ähnlich. Daher beschränkt sich aus Gründen der Übersichtlichkeit die Darstellung in Abbildung 4-13 (unten) auf die Graustufenwertentwicklung für die 5 ROIs auf der Betonplatte. Die Graustufenwerte fallen für alle ROIs in den ersten Minuten nach dem Start stark ab. Die Abnahme der Werte verläuft danach langsamer und pendelt sich schließlich ein. Zum Messstart liegen die Werte für alle ROIs um den Wert 23550 (außer Beton_Mitte mit 23586), nach ca. 15 min zwischen 22310 und 22390, nach ca. 30 min zwischen 22190 und 22260 und nach ca. 60 min zwischen 22070 und 22130. Nachdem sich die Werte stabilisiert haben, liegen die Graustufenwerte zwischen 21970 und 22070.

Bei der Betrachtung der Abbildung 4-13 (unten) fällt auf, dass die Graustufenwertentwicklung mit der Temperaturentwicklung des FPAs und des Signalverarbeitungsprozessors korreliert. Zum Messbeginn findet ein schneller Temperaturanstieg statt, gleichzeitig fallen die Graustufenwerte stark ab. Anschließend verläuft sowohl die Temperaturzunahme als auch die Werteabnahme langsamer bis sich die Werte stabilisieren.

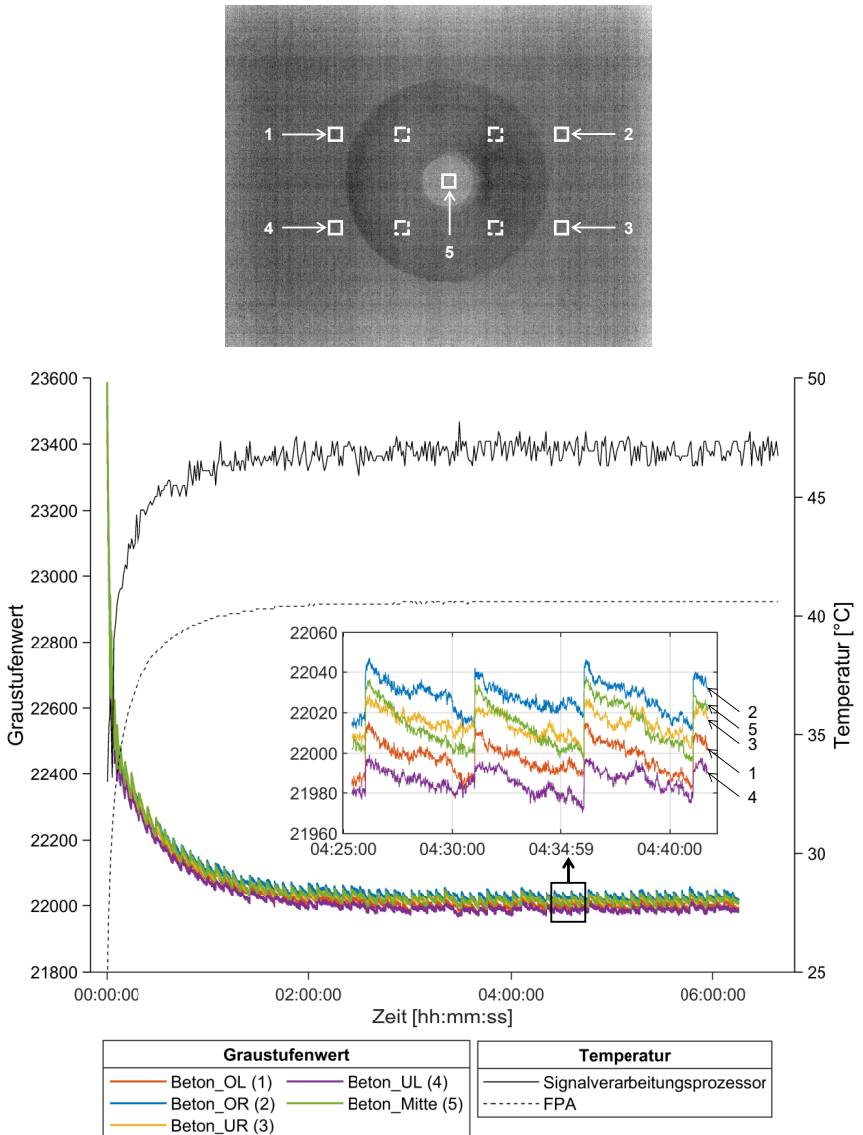


Abbildung 4-13: Position der ROIs auf Anker- und Betonplatte (oben), Graustufenwertentwicklung für ROIs auf der Betonplatte und Temperaturentwicklung (unten)

Im vergrößerten Bildausschnitt der Abbildung 4-13 (unten) ist erkennbar, dass die Graustufenwerte für alle ROIs periodisch sprunghaft ansteigen und sich danach langsam verringern.

Diese wiederkehrenden sprunghaften Anstiege der Graustufenwerte werden über den gesamten Verlauf der Messung für alle ROIs festgestellt und können auf die FFC zurückgeführt werden (siehe Kapitel 3.3.3). Besonders stark steigen die Graustufenwerte für alle ROIs nach einer FFC in den ersten Minuten nach dem Kamerastart an. Hier liegt die Graustufenerhöhung nach erfolgter FFC zum Teil im dreistelligen Bereich.

Die Einstellungen zur FFC sind in der GUI des Kameraherstellers zu finden. Für den Boson Kamerakern wird die FFC bei einer Temperaturänderung des FPAs von 1 °C, spätestens jedoch alle 5 min, durchgeführt (Werkseinstellung). Da nach dem Einschalten der Kamera deren Temperatur in den ersten Minuten schnell ansteigt, wird die FFC zu Beginn häufiger ausgelöst. Dabei ist werksseitig eingestellt, dass innerhalb einer vorgegebenen FFC-Startzeit die FFC schon nach einer Temperaturänderung, die einen Drittel des festgelegten Werts (hier 1 °C) beträgt, erfolgt. Die FFC-Startzeit ist laut Datenblatt auf 150 s eingestellt. [59]

4.2.3 Kamerabetrieb bei verschiedenen Umgebungstemperaturen²

Um den Einfluss verschiedener Umgebungstemperaturen auf das Kamerasystem zu untersuchen, wurden mehrere Messungen in der Klimakammer durchgeführt und anschließend die Entwicklung der Temperatur des FPAs und des Signalverarbeitungsprozessors sowie der Graustufenwerte analysiert.

Beim Abbau von untertägigen Rohstoffvorkommen steigen tendenziell die Umgebungstemperaturen mit zunehmender Teufe an. Aus Sicherheits- und Arbeitsschutzaspekten können Temperaturgrenzen vorgeschrieben werden, bei deren Überschreitung die Arbeitszeit vor Ort reduziert oder eingestellt werden muss. So wird bspw. in der Klima-Bergverordnung (KlimaBergV) außerhalb des Salzbergbaus eine Reduzierung der Arbeitszeit vorgesehen, wenn eine Trockentemperatur³ von 28 °C oder eine Effektivtemperatur⁴ von 25 °C überstiegen wird (§ 3 Absatz 1 KlimaBergV). Zum Schutz der Gesundheit und Sicherheit der Mitarbeitenden sowie zur Aufrechterhaltung einer effizienten Produktion ist vom Bergwerksbetreiber durch eine angemessene Bewetterung eine akzeptable Umgebungstemperatur sicherzustellen. Vor diesem Hintergrund wird eine maximale Umgebungstemperatur von 35 °C für die Auslegung des Kamerasystems als realistisch angesehen.

² Dieses Kapitel nimmt Bezug auf die Masterarbeit von Stephane Kellian Nde Talla: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Bildqualität eines Infrarotkamerasystems in Hinblick auf den Einsatz im untertägigen Ankerbohr- und Setzprozess. Angefertigt am 08.09.2021 am Institute for Advanced Mining Technologies, RWTH Aachen University. Betreuende Professorin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen, Wissenschaftliche Betreuerin: Violetta Storoschewich M. Sc. RWTH

³ Laut § 2 KlimaBergV ist die Trockentemperatur die Temperatur der Wetter, die am trockenen Thermometer in °C gemessen wird. Die Messung der Feuchtttemperatur erfolgt dagegen am feuchten Thermometer.

⁴ Laut § 2 KlimaBergV wird die Effektivtemperatur nach dem Yaglou-Diagramm abhängig von Trocken- und Feuchtttemperatur sowie Wettergeschwindigkeit in °C ermittelt.

Der Kamerakern ist für einen Umgebungstemperaturbereich von -40 °C bis 80 °C spezifiziert. Eine Unterschreitung der Mindestbetriebstemperatur ist im vorliegenden Anwendungsfall nicht relevant. Im Betrieb erwärmt sich der Signalverarbeitungsprozessor. Werden dadurch Temperaturen von mehr als 105 °C erreicht, können irreparable Schäden auftreten. Daher ist es erforderlich zu überprüfen, ob durch das Schutzgehäuse eine ausreichende Wärmeabfuhr gewährleistet ist, sodass der Kamerakern bei den auftretenden Umgebungstemperaturen sicher eingesetzt werden kann. Um Beschädigungen vorzubeugen, wurde die erste Messung bei einer Temperatur von 15 °C durchgeführt. Die Temperatur wurde bei jeder weiteren Messung um jeweils 5 °C gesteigert. Bei der letzten Messung betrug die Temperatur 35 °C . Die Messdauer betrug jeweils etwas mehr als 1 Stunde. Die gemessene relative Luftfeuchtigkeit lag zwischen 30% und 46% .

In Abbildung 4-14 ist der zeitliche Temperaturverlauf des FPAs bei Umgebungstemperaturen von 15 °C bis 35 °C dargestellt. Zu Beginn liegt die Temperatur des FPAs zwischen 3 °C und 5 °C über der jeweils eingestellten Umgebungstemperatur. Der Unterschied kann dadurch begründet werden, dass die Messdatenaufzeichnung erst beginnen kann, wenn die Kamera hochgefahren ist. Der zeitliche Verlauf der Temperatur des FPAs ist für die eingestellten Umgebungstemperaturen ähnlich. In den ersten Minuten erhöht sich die Temperatur am stärksten und steigt anschließend langsamer an. Zum Messende ist die Temperatur des FPAs um ca. 20 °C höher als die jeweils eingestellte Umgebungstemperatur.

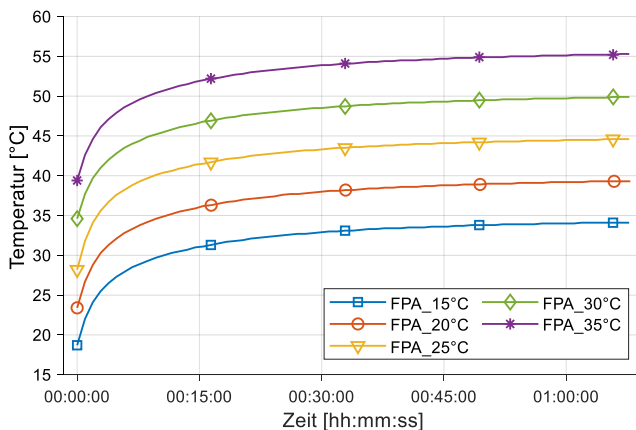


Abbildung 4-14: Zeitlicher Verlauf der Temperatur des FPAs bei Umgebungstemperaturen von 15 °C bis 35 °C

Die Temperatur des Signalverarbeitungsprozessors liegt während der Messungen stets im zulässigen Bereich unterhalb von 105 °C . Die Sichtung der Daten zeigte, dass die Temperatur

des Signalverarbeitungsprozessors zum Messende um ca. 25 °C höher ist als die jeweils eingestellte Umgebungstemperatur. Dabei beträgt die höchste gemessene Temperatur ca. 61,9 °C bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C.

Bei den anschließenden Untersuchungen zur Entwicklung der durchschnittlichen Graustufenwerte bei verschiedenen Umgebungstemperaturen wurde in analoger Weise vorgegangen wie in der mehrstündigen Messung zum Kamerabetrieb. Im Folgenden wird die Entwicklung der Graustufenwerte der ROI Beton_Mitte bei verschiedenen Temperaturen betrachtet. Diese ROI befindet sich auf der Betonplatte in der Aussparung der Ankerplatte. Sie wird als repräsentativ für die gesamte Messszene erachtet, da die Graustufenwerte für die ROIs innerhalb der Messszene nahe beieinander liegen und die Werteentwicklung ähnlich verläuft.

In Abbildung 4-15 ist die Graustufenwertentwicklung bei Umgebungstemperaturen von 15 °C bis 35 °C jeweils für die ROI Beton_Mitte dargestellt.

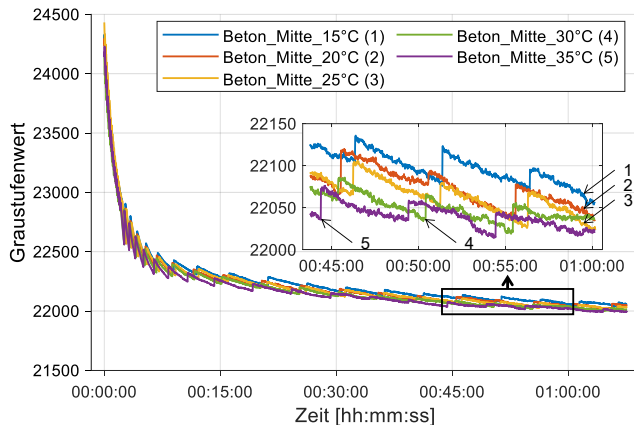


Abbildung 4-15: Graustufenwertentwicklung bei Umgebungstemperaturen von 15 °C bis 35 °C jeweils für die ROI Beton_Mitte

Im Diagramm fallen zu Beginn die Graustufenwerte stark ab. Dies korreliert mit dem schnellen Temperaturanstieg des FPAs (siehe Abbildung 4-14). Anschließend sinken die Graustufenwerte deutlich langsamer. Zur gleichen Zeit steigt auch die Temperatur des FPAs langsamer an (siehe Abbildung 4-14). Die Graustufenwerte der ROI Beton_Mitte liegen beim Start für alle Umgebungstemperaturen zwischen 24000 und 24500, nach ca. 15 min zwischen 22200 und 22300 und nach ca. 30 min zwischen 22100 und 22200. Zum Messende, nach ca. 60 min, liegen die Graustufenwerte zwischen 22000 und 22100. Wie schon bei der Messung des Kamerabetriebs über mehrere Stunden, kann ein wiederkehrender sprunghafter Anstieg der Graustufenwerte beobachtet werden. Dieser kann auf die FFC zurückgeführt werden. Zudem

gibt es einen kleinen, messbaren Einfluss der Umgebungstemperaturen auf die Graustufenwerte. Wie in Abbildung 4-15 zu sehen ist, sind nach der Aufwärmphase tendenziell die Graustufenwerte bei kleineren Umgebungstemperaturen größer als bei höheren. Die Differenz zwischen den Verläufen ist in Relation zu den absoluten Werten so gering, dass dieser Effekt für die Kunstharzerkennung vernachlässigt werden kann.

4.2.4 Zwischenfazit

Die Kamera hat eine Aufwärmphase, die in dem betrachteten Temperaturbereich von 15 °C bis 35 °C ungefähr gleich lang ist. Sowohl bei einem Betrieb über mehrere Stunden als auch bei verschiedenen Umgebungstemperaturen kann nach dem Start der Kamera eine Abnahme der Graustufenwerte und gleichzeitig eine Zunahme der Temperatur des FPAs und des Signalverarbeitungsprozessors beobachtet werden. Die Werteabnahme und die Temperaturzunahme werden im Verlauf der Messungen stetig langsamer. Bei einem Kamerabetrieb über mehrere Stunden stabilisieren sich sowohl die Graustufenwerte als auch die Temperatur des FPAs und des Signalverarbeitungsprozessors. Über alle Messungen hinweg kann eine sich wiederholende, sprunghafte Änderung der Graustufenwerte aufgrund der FFC beobachtet werden. Dabei wird die FFC in den ersten Minuten nachdem die Kamera eingeschaltet wird infolge der schnellen Temperaturänderung des FPAs in kurzen Abständen ausgelöst.

Zur Sicherstellung einer zuverlässigen Kunstharzerkennung, wird die Einhaltung einer Aufwärmphase der Kamera vor Beginn der Bildaufnahme empfohlen. Zudem sollten während eines laufenden Injektionsvorgangs kamerainterne Vorgänge, wie die FFC, unterbunden werden. Bei Pausen oder Unterbrechungen sollte die Kamera nicht ausgeschaltet werden, um erneute Aufwärmphasen zu vermeiden.

Das IR-Kamerasystem ist für einen mehrstündigen Betrieb und die betrachteten Umgebungstemperaturen einsetzbar. Die Temperatur des Signalverarbeitungsprozessors liegt sowohl bei einem Betrieb über mehrere Stunden als auch bei hohen Umgebungstemperaturen stets unterhalb der zugelassenen Maximaltemperatur. Dies zeigt, dass der Kamerakern sicher vor Überhitzung betrieben werden kann.

Für diesen Messaufbau fallen die Unterschiede in den Graustufenwerten bei den betrachteten Umgebungstemperaturen von 15 °C bis 35 °C gering aus. Bezogen auf den gesamten Graustufenbereich ist die Differenz vernachlässigbar. Dabei sei angemerkt, dass es sich bei dem verwendeten Kamerakern um eine nicht radiometrische Version handelt. Das heißt absolute Temperaturmessungen sind mit diesem Modell nicht vorgesehen.

Aus Sicherheits- und Gesundheitsschutzaspekten wurde das unter Tage verwendete Kunstharzprodukt nicht in der Klimakammer getestet. Alle Messungen mit Kunstharz erfolgten unter

Tage und werden im folgenden Unterkapitel beschrieben. Im Fokus steht dabei die Entwicklung der Graustufenwerte für das ausgetretene Kunstharz im Vergleich zum Hintergrund unter realen Bedingungen.

4.3 Untersuchungen zum Kunstharzaustritt während des Injektionsvorgangs

Um einen geeigneten Ansatz zur Kunstharzerkennung basierend auf Infrarotthermographie entwickeln zu können, wurden Untersuchungen zum Kunstharzaustritt anhand von IR-Bildern aus einer Testmessung im LKAB Eisenerzbergwerk Kiruna durchgeführt. Dazu wurde der Injektionsvorgang mit einer IR-Kamera aufgenommen und die Bilddaten analysiert.

Die Testmessung wurde im Rahmen eines Testbetriebs eines modifizierten Ankerbohrwagens des Modells Boltec E der Firma Epiroc durchgeführt. Eine persönliche Teilnahme war aufgrund der SARS-CoV-2-Pandemie nicht möglich. Aus diesem Grund wurde das IR-Kamerasystem vom Personal vor Ort in Betrieb genommen. Installations- und Betriebsanweisungen wurden zur Verfügung gestellt. Detaillierte Ausführungen zum IR-Kamerasystem sowie der Positionierung auf dem Ankerbohrwagen sind in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 gegeben. Die Aufnahme der Daten erfolgte wie in Kapitel 4.1.4 beschrieben.

Während der Testmessung wurden SDA-Anker zusammen mit einem pumpfähigen Zweikomponenten-Kunstharz auf Silikatharzbasis eingesetzt. An notwendigen Stellen wurden zudem Gitterdrahtmatten angebracht. Die Messungen wurden an zwei Tagen innerhalb derselben Strecke in einer Teufe von 1100 m mit dem Tau2 Kamerakern aufgenommen. Laut Angabe des Bergwerksbetreibers betrug die Umgebungstemperatur während der Testmessung im Durchschnitt 17 °C bis 20 °C. Eine Angabe zur relativen Luftfeuchtigkeit lag nicht vor.

4.3.1 Visuelle Begutachtung des Kunstharzaustritts anhand des Bildmaterials

Insgesamt standen 15 Messungen aus der Testmessung für Untersuchungszwecke zur Verfügung. Die Messungen mit Kunstharzaustritt sind in Anlage 1 und ohne Kunstharzaustritt in Anlage 2 aufgelistet. In 7 von 15 Messungen (VT1 bis VT6, VT15) konnte ein Kunstharzaustritt während des Injektionsvorgangs visuell festgestellt werden, in den 8 weiteren Messungen (VT7 bis VT14) nicht. Bei 2 der 8 Messungen ohne Kunstharzaustritt, VT9 und VT10, wurde die Injektion mehrmals unterbrochen. Daher wurden diese 2 Messungen nicht für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit einbezogen und sind nicht in Anlage 2 aufgeführt.

Aus der visuellen Begutachtung geht hervor, dass ausgetretenes Kunstharz im IR-Bild hell dargestellt wird und deutlich erkennbar ist. Die dabei auftretenden höheren Graustufenwerte bedeuten, dass der Detektor eine höhere Emission infraroter Strahlung in diesem Bereich erfasst. Folglich muss eine höhere Temperatur und/oder ein höherer Emissionsgrad vorliegen.

Die höhere Temperatur ist durch die exotherme Reaktion der zwei Kunstharzkomponenten zu erklären (siehe Kapitel 2.1.3).

4.3.2 Durchschnittliche Graustufenwerte für Gestein, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz

Im nächsten Schritt wurde die Entwicklung der Graustufenwerte für Gestein, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz anhand ausgewählter Messungen mit und ohne Kunstharzaustritt untersucht. Dafür wurden in den IR-Bildern objektbezogene ROIs mit einer Größe von 5 x 5 Pixel ausgewählt. Die Auswahl erfolgte händisch, da die Position der Objekte in den Messungen variierte und Gitterdrahtmatten aus den ROIs für das Gestein ausgeschlossen werden mussten. Für das Gestein wurden zwei ROIs ausgewählt. Die erste ROI befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Ankerplatte und die zweite ROI in einem Abstand von etwa 200 bis 350 mm. Diese werden im Folgenden als „Gestein nah“ und „Gestein fern“ bezeichnet. Die jeweilige ROI für Ankerplatte und Kunstharz wird Ankerplatte-ROI bzw. Kunstharz-ROI genannt. In den objektbezogenen ROIs wurde über die Graustufenwerte der einzelnen Pixel der Durchschnittswert (arithmetische Mittel) für jedes Bild berechnet.

Messergebnisse mit Kunstharzaustritt

Für Messung VT3 ist in Abbildung 4-16 links der zeitliche Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts in den objektbezogenen ROIs dargestellt. Für die Kunstharz-ROI sind die Graustufenwerte separat auf der rechten y-Achse (lila) aufgetragen, da diese größer ausfallen als für die anderen ROIs. Rechts in Abbildung 4-16 ist die Lage der ROIs in einem IR-Bild der Messung VT3 eingezeichnet.

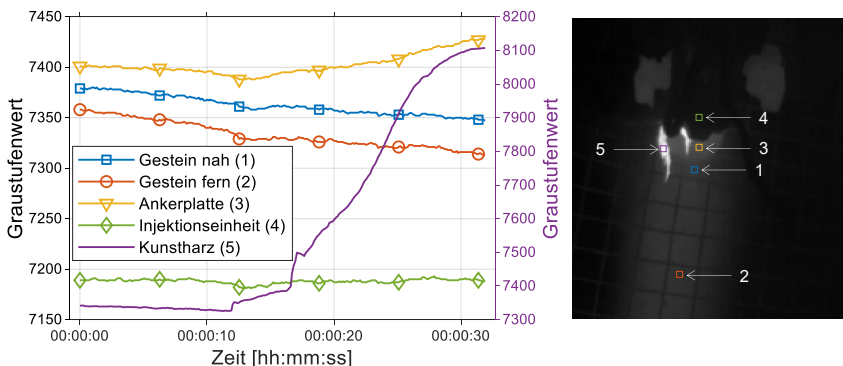


Abbildung 4-16: Zeitlicher Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für Gestein, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz (links) sowie Positionsangabe der ROIs (5 x 5 Pixel) in einem IR-Bild (rechts), Messung VT3 mit Kunstharzaustritt

Über den Injektionsvorgang ist der durchschnittliche Graustufenwert für die Injektionseinheit überwiegend konstant. Für das Gestein nimmt der Durchschnittswert in beiden ROIs ab. Zuerst sinkt der durchschnittliche Graustufenwert für die Ankerplatte ebenfalls minimal, steigt jedoch nach ca. 15 s wieder leicht an, nachdem Kunstharz ausgetreten ist. Obwohl in der Ankerplatte-ROI selbst kein Kunstharz austritt, beeinflusst der Kunstharzaustritt in unmittelbarer Nähe durch Wärmeübertragung auch diesen Ankerplattenteil. Der Anstieg in der Kunstharz-ROI ist jedoch signifikant größer.

Nach einer ca. 55-minütigen Unterbrechung ist das ausgetretene Kunstharz abgekühlt. Im Bildbereich des Kunstharzaustritts liegen die Graustufenwerte für das abgekühlte Kunstharz unter 7200. Damit sind die Graustufenwerte kleiner als bei der Untersuchung der Durchschnittswerte in der Kunstharz-ROI zum Injektionsbeginn (über 7300). Die Ankerplatte hat sich ebenfalls abgekühlt. Zu Beginn der Kunstharzinjektion beträgt der Durchschnittswert in der Ankerplatte-ROI ca. 7400. Die Graustufenwerte liegen nach der Unterbrechung etwas über 7200, was auf eine fortschreitende Abkühlung schließen lässt.

Ebenfalls wurde für Messung VT5 die Entwicklung der durchschnittlichen Graustufenwerte für Gestein, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz untersucht. In Abbildung 4-17 sind der zeitliche Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für die Objekte und die Lage der ROIs in einem IR-Bild zusammengefasst.

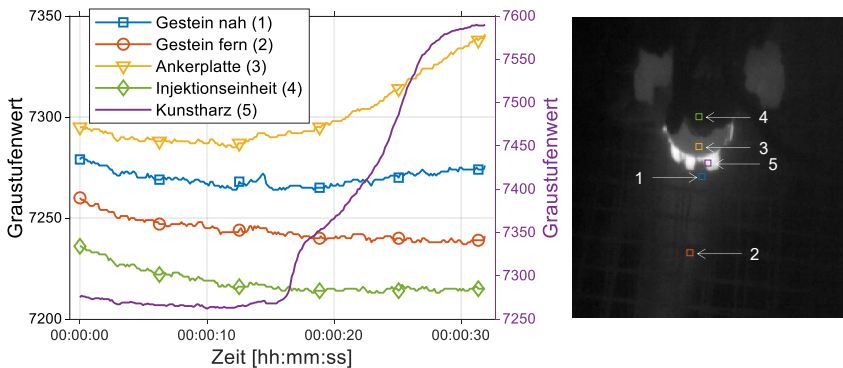


Abbildung 4-17: Zeitlicher Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für Gestein, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz (links) sowie Positionsangabe der ROIs (5 x 5 Pixel) in einem IR-Bild (rechts), Messung VT5 mit Kunstharzaustritt

Zu Beginn sinken die Durchschnittswerte aller ROIs. Dabei ähneln sich die Werteverläufe. Dies kann neben einer möglichen Abkühlung der Messszene auch auf kamerainterne Vorgänge zurückzuführen sein. Im Weiteren fällt auf, dass unmittelbar nachdem nach ca. 12 s ein Kunstharzaustritt erfolgt, der jeweilige Durchschnittswert der ROIs für Ankerplatte und Gestein nah steigen. Beide ROIs liegen in der Nähe der Austrittsstelle. Dies lässt den Schluss zu, dass

eine Wärmeübertragung zu einer geringen Erhöhung der Graustufenwerte in der unmittelbaren Umgebung führen kann. Wie in Messung VT3, ist der Anstieg des Durchschnittswerts der Kunstharz-ROI um ein Vielfaches höher.

Zusätzlich wurden die Messungen VT1 und VT2 in analoger Weise analysiert. Die Entwicklung der Durchschnittswerte der objektbezogenen ROIs über die Zeit ist in Abbildung 4-18 zu sehen. Die Ergebnisse der Messung VT1 lassen darauf schließen, dass kamerainterne Vorgänge die Graustufenwerte beeinflussen. In diesem Fall steigen alle Durchschnittswerte mit annähernd gleichem Verlauf an. Daher kann auf dieser Basis keine Aussage zur Erwärmung oder Abkühlung der betrachteten Objekte getätigt werden. Allerdings fällt auf, dass der durchschnittliche Graustufenwert der Kunstharz-ROI stärker steigt als die der anderen ROIs. Auch bei der Betrachtung der Messung VT2 wird der Einfluss kamerainterner Vorgänge deutlich. In Messung VT2 ist ein gleichzeitiges sprunghaftes Absinken aller Durchschnittswerte zu Beginn und am Ende des Injektionsvorgangs zu beobachten. Aufgrund der zu diesen Zeitpunkten verringerten Bildrate wird angenommen, dass hier ein kamerainterner Vorgang stattfand. Auch für Messung VT2 steigt der Durchschnittswert der Kunstharz-ROI, wenn Kunstharz sichtbar wird. Außerdem erhöht sich nach dem Kunstharzaustritt der Durchschnittswert der Ankerplatte-ROI, allerdings ist dieser Anstieg um ca. Faktor 7 geringer als für die Kunstharz-ROI. Die Durchschnittswerte für das Gestein und die Injektionseinheit steigen nicht.

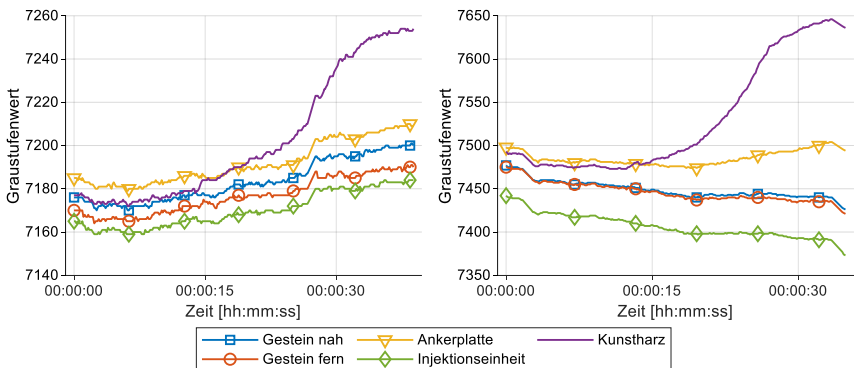


Abbildung 4-18: Zeitlicher Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für Gestein, Ankerplatte, Injektionseinheit und Kunstharz, Messung VT1 (links) und Messung VT2 (rechts)

Messergebnisse ohne Kunstharzaustritt

Für die Messungen ohne Kunstharzaustritt fehlt die Kunstharz-ROI. Ansonsten ist die Vorgehensweise dieselbe wie für die Messungen mit Kunstharzaustritt. In Abbildung 4-19 sind der zeitliche Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der objektbezogenen ROIs und die Lage

der ROIs in einem IR-Bild der Messung VT7 dargestellt. Die Messung VT7 wurde für die Untersuchung der Durchschnittswerte ausgewählt, um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten, da diese am gleichen Tag wie die Messungen VT1 bis VT6 aufgenommen wurde.

Den höchsten Durchschnittswert hat das Gestein fern und die niedrigsten die Injektionseinheit. Während des Injektionsvorgangs ändert sich der Durchschnittswert für die Injektionseinheit kaum. Gleiches gilt für die Ankerplatte. Der sinkende Durchschnittswert für das Gestein, hier insbesondere für das Gestein fern, lässt den Schluss zu, dass die Temperatur des Gesteins durch die Bohrspülung beeinflusst wird. Zusätzlich fällt auf, dass zu Beginn der Durchschnittswert der ROI für das Gestein nah etwas höher ist als für die Ankerplatte. Im Verlauf des Arbeitsschrittes ändert sich dies jedoch. Ein Anstieg des Durchschnittswerts im späteren Verlauf des Injektionsvorgangs, wie bei den Messungen mit Kunstharzaustritt, kann für die Ankerplatte-ROI nicht beobachtet werden.

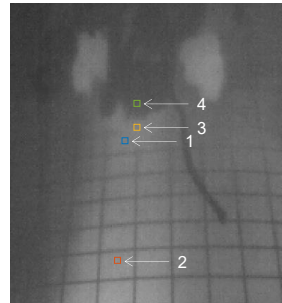
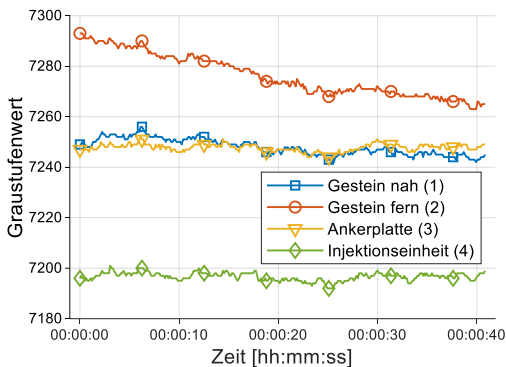


Abbildung 4-19: Zeitlicher Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für Gestein, Ankerplatte und Injektionseinheit (links) sowie Positionsangabe der ROIs (5 x 5 Pixel) in einem IR-Bild (rechts), Messung VT7 ohne Kunstharzaustritt

Auch bei der Betrachtung der zeitlichen Verläufe weiterer Messungen ohne Kunstharzaustritt kann kein Anstieg der Durchschnittswerte über den Injektionsvorgang festgestellt werden, der aufgrund seiner Größe fälschlicherweise auf austretendes Kunstharz hindeuten könnte. Zusätzlich ist in Abbildung 4-20 für Messung VT12 der zeitliche Verlauf der durchschnittlichen Graustufenwerte für Gestein, Ankerplatte und Injektionseinheit dargestellt. Wie in Messung VT7 hat das Gestein fern die höchsten Durchschnittswerte und die Injektionseinheit die niedrigsten. Jedoch liegen die Durchschnittswerte der ROIs näher beieinander als in Messung VT7.

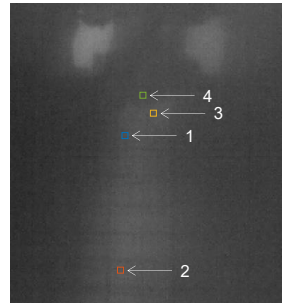
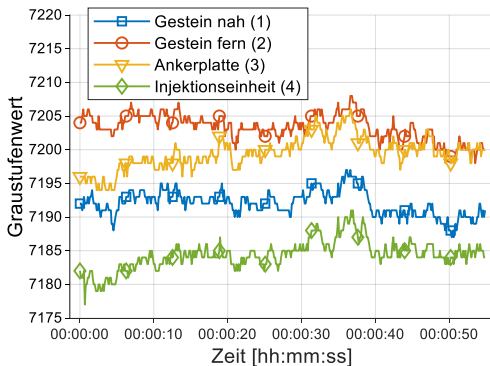


Abbildung 4-20: Zeitlicher Verlauf des jeweiligen Durchschnittswerts der ROIs für Gestein, Ankerplatte und Injektionseinheit (links) sowie Positionsangabe der ROIs (5 x 5 Pixel) in einem IR-Bild (rechts), Messung VT12 ohne Kunstharzaustritt

Zwischenfazit

Die Betrachtung der Durchschnittswerte ermöglicht es, sich eine Übersicht über Graustufenlage und -verlauf für das austretende Kunstharz und die unmittelbare Umgebung zu verschaffen. Bei den Messungen ohne Kunstharzaustritt kann keine signifikante Erhöhung der durchschnittlichen Graustufenwerte über den Injektionsvorgang festgestellt werden. Dahingegen kann bei den Messungen mit Kunstharzaustritt für die Kunstharz-ROIs ein starker Anstieg des Durchschnittswerts festgestellt werden. Zwar zeigt sich, dass sich auch die Durchschnittswerte der umliegenden ROIs erhöhen können, jedoch ist diese Erhöhung gering.

Da nicht vorab festgelegt werden kann, an welcher Stelle genau Kunstharz austritt und sichtbar wird, muss für die Erkennung ein größerer Bildbereich einbezogen werden, der die Ankerplatte und den Bereich um die Ankerplatte vollständig umfasst. Jedoch führt die Berechnung von Durchschnittswerten in einer größeren ROI dazu, dass die Werte bei einem Kunstharzaustritt kleiner ausfallen, als wenn nur die Bereiche mit Kunstharz einbezogen werden. Zudem deuten die Ergebnisse der Messungen mit Kunstharzaustritt darauf hin, dass kamerainterne Vorgänge die Verläufe der Durchschnittswerte beeinflussen können. Da sich in diesen Fällen die störenden Einflüsse gleichmäßig auf die Absolutwerte aller ROIs auswirken, ist ein möglicher Ansatz diese durch eine relative Betrachtung zu kompensieren.

Aus den im vorherigen Abschnitt genannten Gründen werden in den weiteren Untersuchungen nicht die Durchschnittswerte, sondern der minimale und maximale Graustufenwert sowie deren Differenz, die Spannweite, als mögliche Messgrößen zur Kunstharzerkennung betrachtet. Die Bestimmung einer geeigneten ROI für die Kunstharzerkennung wird im nächsten Unterkapitel behandelt.

4.3.3 ROI-Wahl

Die Wahl einer passenden ROI ist entscheidend für eine sichere und schnelle Erkennung eines Kunsthazustritts während des Injektionsvorgangs. In den IR-Bildern können sich verschiedene Objekte aus der unmittelbaren Umgebung durch hohe Strahlungsemissionen störend auf die Kunsthazerkennung auswirken (siehe Kapitel 4.1.1). Dazu zählen bspw. weitere neu installierte Anker mit Kunsthazustritt, Leitungen an der Firste oder Maschinenteile. Im Folgenden wird anhand der Messung VT2 aufgezeigt, wie sich die Wahl der ROI auf die Kunsthazerkennung auswirkt. Dafür wird der minimale und maximale Graustufenwert jeweils im gesamten Bildbereich sowie innerhalb einer rechteckigen und einer kreisförmigen ROI ermittelt. Danach wird die Spannweite, die Differenz aus minimalen und maximalen Graustufenwert, für jedes Bild bzw. jede ROI berechnet.

In Abbildung 4-21 ist zum Vergleich eine rechteckige und eine kreisförmige ROI in einem IR-Bild der Messung VT2 dargestellt. Die kreisförmige ROI umfasst die Ankerplatte und einen Teil der Injektionseinheit sowie die Gesteinsoberfläche in unmittelbarer Umgebung der Ankerplatte. Andere Objekte, wie z. B. der Greifer, liegen außerhalb der ROI und werden somit ausgeschlossen. Der Greifer dient dazu, einen Anker in Position zu halten (siehe Abbildung 2-7). Er kann sich z. B. durch Reibung während des Ankerbohr- und -setzprozesses erwärmen. Der Mittelpunkt der kreisförmigen ROI liegt unter der Injektionseinheit. Der minimale Graustufenwert befindet sich bei Anwendung einer kreisförmigen ROI mehrheitlich auf der Injektionseinheit, kann jedoch auch auf dem Gestein liegen, wie in weiteren Messungen festgestellt. Im Gegensatz zur kreisförmigen ROI umfasst die rechteckige ROI auch den erwärmten Greifer sowie einen Teil der Umgebung. Dementsprechend können der minimale und maximale Graustufenwert in einem größeren Bildbereich detektiert werden. Im IR-Bild aus Abbildung 4-21 liegt sowohl bei Verwendung der rechteckigen ROI als auch im Vollbild der maximale Graustufenwert auf dem Greifer.

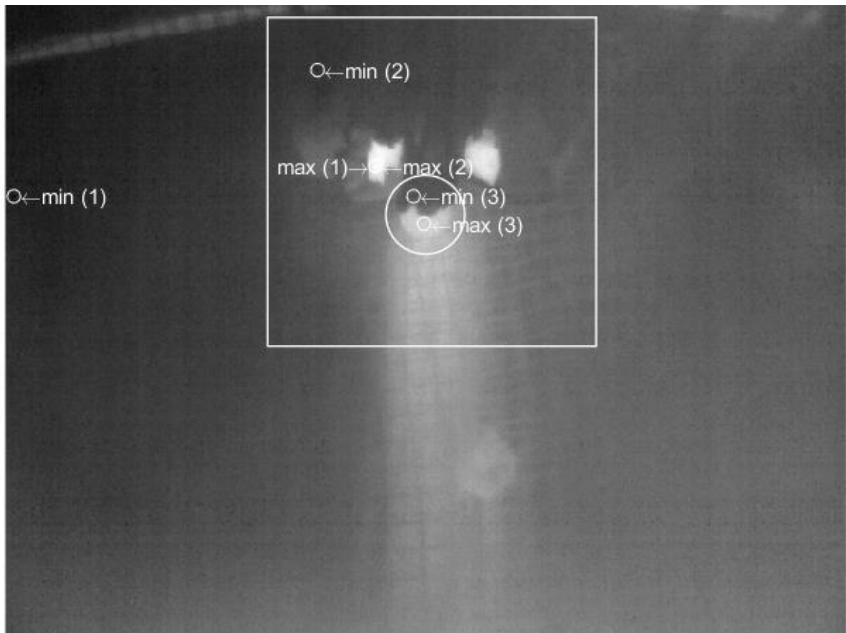


Abbildung 4-21: Minimaler und maximaler Graustufenwert im Vollbild (1) sowie in rechteckiger ROI (2) und kreisförmiger ROI (3), Messung VT2

In Abbildung 4-22 ist für Messung VT2 der zeitliche Verlauf der Spannweite für unterschiedliche Bildbereiche bis kurz vor dem Loslassen des Ankers dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Spannweite zum selben Zeitpunkt für das Vollbild am größten und für die kreisförmige ROI am kleinsten ist. Im Weiteren fällt auf, dass für die kreisförmige ROI die Spannweite während des Injektionsvorgangs früher ansteigt. Dabei wird visuell festgestellt, dass bei Anwendung der kreisförmigen ROI der maximale Graustufenwert ab Sekunde 15 auf dem gerade erst austretenden Kunstharz liegt. Bei der rechteckigen ROI oder im Vollbild befindet sich erst ab Sekunde 19 der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz. Der Unterschied beträgt 4 s. Bei einem Arbeitsschritt, der unter einer Minute dauert, stellt dies einen signifikanten Unterschied dar. Im realen Einsatz kann eine Verzögerung des Injektionsstopps um wenige Sekunden im Laufe einer Schicht Verluste in der Größenordnung mehrerer Liter verursachen.

Zusätzlich ist in Abbildung 4-22 erkennbar, dass zu Beginn und am Ende sich Lücken in den Messwerten befinden. Dies kann durch die FFC begründet sein. Darauf weist die zu diesen Zeitpunkten geringe Bildrate hin. Nach dem jeweiligen Korrekturvorgang fallen der minimale und maximale Graustufenwert in den IR-Bildern abrupt ab. Der minimale Graustufenwert sinkt stärker, sodass sich die Spannweite insgesamt vergrößert.

Bei Anwendung der kreisförmigen ROI ist der Anstieg der Spannweite am größten. Insgesamt erhöht sich die Spannweite für die kreisförmige ROI ca. um den Faktor 4,5 bis 5. Dagegen steigt die Spannweite für das Vollbild und die rechteckige ROI ca. um den Faktor 3,5 bis 4.

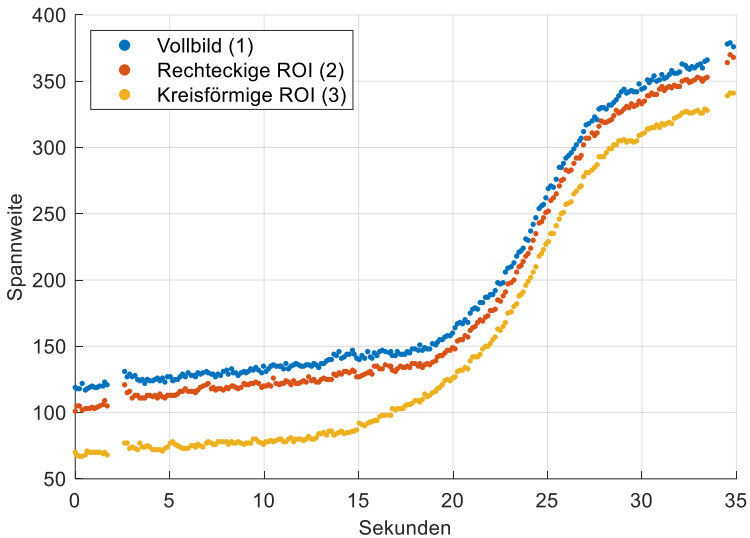


Abbildung 4-22: Zeitlicher Verlauf der Spannweite für Vollbild sowie rechteckige ROI und kreisförmige ROI, Messung VT2

Zwischenfazit

Sowohl die rechteckige als auch die kreisförmigen ROI erfassen den relevanten Bereich vollständig. Ein Teil der Injektionseinheit liegt innerhalb der beiden ROIs. Wie in den Untersuchungen zu den Durchschnittswerten in Kapitel 4.3.2 gezeigt wurde, sind die Werte für die Injektionseinheit niedrig, sodass nicht von hohen Strahlungsemissionen auszugehen ist, die sich negativ auf die Kunstharzerkennung auswirken könnten. Im Gegensatz dazu, variieren die Strahlungsemissionen des umliegenden Gesteins und der vorderen Maschinenteile stärker. Insbesondere der Greifer kann hohe Strahlungsemissionen aufweisen. In der rechteckigen ROI wird der Greifer miterfasst. Um die Genauigkeit und die Geschwindigkeit der Erkennung nicht negativ zu beeinflussen, ist die kreisförmige ROI auf die Ankerplatte sowie den unmittelbaren Bereich um die Ankerplatte beschränkt. Daher ist die kreisförmige ROI für die Kunstharzerkennung am besten geeignet.

4.3.4 Minimaler und maximaler Graustufenwert sowie Spannweite

Im Folgenden werden die in der Testmessung im LKAB Eisenerzbergwerk Kiruna erhobenen Daten ausgewertet. Dazu werden in den IR-Bildern der jeweils auftretende minimale und maximale Graustufenwert ermittelt. Anschließend wird die Spannweite, die Differenz aus minimalen und maximalen Graustufenwert, berechnet. Die Ermittlung des minimalen und maximalen Graustufenwerts erfolgt in einer vordefinierten kreisförmigen ROI, um Objekte mit potenziell hohen Strahlungsemissionen auszuschließen. Für alle Messungen ist die kreisförmige ROI gleich groß. Der jeweilige Mittelpunkt der ROI wird für jede Messung manuell ausgewählt. Der Grund dafür ist, dass sich der Blickwinkel auf die Ankerplatte und die Gesteinsoberfläche abhängig vom Anstellwinkel des Bohrarms in Bezug auf den Stoß bzw. die Firste änderte.

Um die Unterschiede zwischen den Messungen mit und ohne Kunstharzaustritt zu untersuchen, wird zuerst der zeitliche Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite während des Injektionsvorgangs betrachtet. Anschließend folgt eine vergleichende Betrachtung der drei Messgrößen. Dabei wird aufgezeigt, weshalb die Spannweite die zuverlässigste Messgröße zur Kunstharzerkennung ist.

Messergebnisse mit Kunstharzaustritt

Exemplarisch ist in Abbildung 4-23 (oben) der zeitliche Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite über die Gesamtprozessdauer der Kunstharzinjektion für Messung VT3 dargestellt. Die Graustufenwerte für den minimalen und maximalen Graustufenwert sind auf der linken y-Achse (schwarz) aufgetragen. Auf der rechten y-Achse (orange) ist die Graustufendifferenz für die Spannweite abgebildet. Der jeweilige Zeitpunkt, ab dem der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz liegt und die Ankerstange losgelassen wird, ist markiert. Zudem sind in Abbildung 4-23 (unten) die dazugehörigen IR-Bilder 1 bis 4 illustriert. Diese zeigen zu ausgewählten Zeitpunkten des Injektionsvorgangs einen Bildausschnitt mit eingezeichneter kreisförmiger ROI (gelb) sowie minimalem (blau) und maximalem (rot) Graustufenwert. Die Bildzeitpunkte sind in der Abbildung 4-23 (oben) gekennzeichnet.

In Abbildung 4-23 ist zu sehen, dass zu Beginn des Injektionsvorgangs der minimale und maximale Graustufenwert annähernd konstant sind. Der maximale Graustufenwert befindet sich zuerst auf der Ankerplatte (siehe Bild 1). Unmittelbar nachdem Kunstharz austritt, liegt der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz zwischen Ankerplatte und -mutter (siehe Bild 2). Durch die exotherme Reaktion der beiden Kunstharzkomponenten wird Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Der maximale Graustufenwert liegt bis zum Kunstharzaustritt bei ca. 7400. Danach steigt er innerhalb von ca. 15 s auf ca. 8210. Der Anstieg des maximalen Graustufenwerts führt dazu, dass das ausgetretene Kunstharz sich vom dunkleren Hintergrund abhebt, was auf höhere Strahlungsemissionen und somit höhere Temperaturen hinweist. Gleichzeitig bleibt über den Injektionsvorgang der minimale Graustufenwert nahezu

unverändert bei ca. 7160 und liegt durchgehend auf der Injektionseinheit. Folglich steigt die Spannweite ca. um den Faktor 4 an.

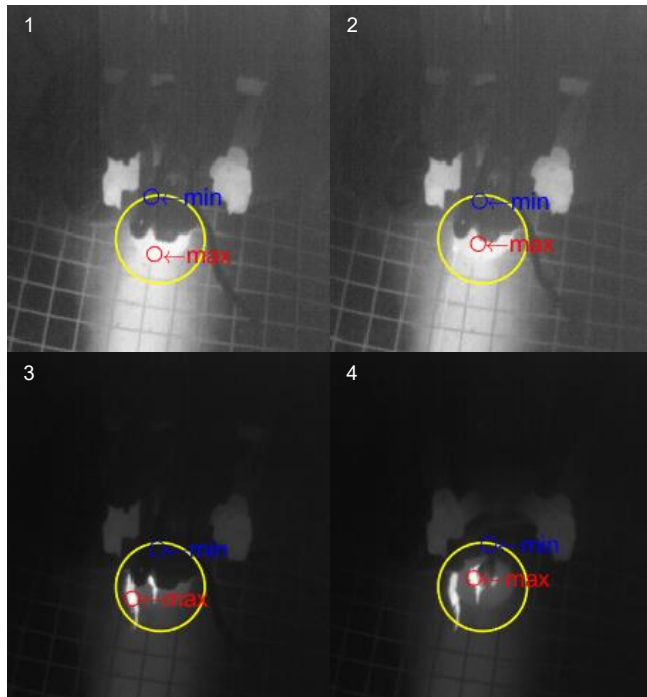
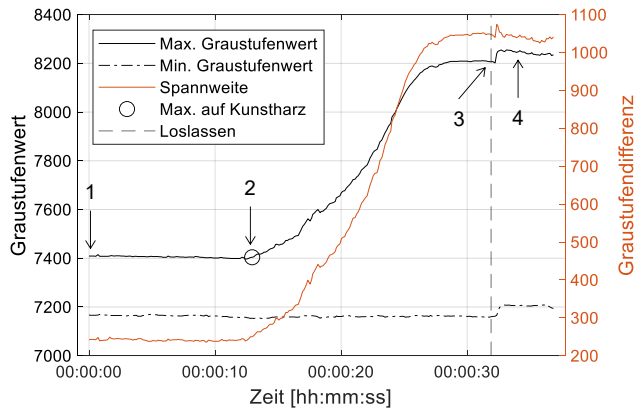


Abbildung 4-23: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite (oben); IR-Bilder 1 bis 4 zu verschiedenen Zeitpunkten des Injektionsvorgangs (unten), Messung VT3 mit Kunstharzaustritt

Vor dem Loslassen des Ankers befindet sich der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz zwischen Ankerplatte und Gestein (siehe Bild 3). Nach dem Loslassen des Ankers liegt der maximale Graustufenwert im zuvor verdeckten Bereich zwischen Ankerplatte und -mutter (siehe Bild 4). Nachdem die gesamte Ankerinstallation im Kamerabild sichtbar wird, steigt der maximale Graustufenwert sprunghaft auf ca. 8250 an. Ein weiterer Anstieg erfolgt nicht. Ebenfalls erhöht sich der minimale Graustufenwert sprunghaft auf ca. 7210. Die Injektionseinheit bewegt sich aus der ROI, sodass der minimale Graustufenwert auf dem Gestein liegt.

Für die weiteren 6 Messungen mit Kunstharzaustritt sind in Abbildung 4-24 der Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite über den Injektionsvorgang dargestellt. Der Zeitpunkt, ab dem der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz liegt, ist markiert. Ebenfalls ist der Zeitpunkt des Loslassens des Ankers durch eine gestrichelte Kennlinie gekennzeichnet. In Messung VT15 ist aufgrund der geringen Bildqualität der Zeitpunkt, ab dem der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz liegt, visuell nicht bestimmbar. Daher ist dieser für Messung VT15 nicht gekennzeichnet.

Alle Messungen mit Kunstharzaustritt haben gemeinsam, dass unmittelbar nachdem Kunstharz in den IR-Bildern sichtbar wird, der maximale Graustufenwert im Bereich des Kunstharzaustritts liegt und infolge der chemischen Reaktion der Kunstharzkomponenten mehrere Sekunden ansteigt. Anschließend schwankt der maximale Graustufenwert in einem engen Wertebereich, der höher ist als vor dem Kunstharzaustritt. Mehrheitlich wird erst dann der Anker losgelassen. Jedoch kann in zwei Messungen (Messung VT6, Messung VT15) beobachtet werden, dass der maximale Graustufenwert bis kurz vor dem Loslassen des Ankers und währenddessen weiter ansteigt. Dies lässt den Schluss zu, dass die chemische Reaktion in diesen Fällen noch nicht ihr Maximum erreicht hat. In Messung VT15 endet der Anstieg des maximalen Graustufenwerts erst nach dem Loslassen des Ankers. Dabei liegt der maximale Graustufenwert auch nach dem Loslassen im Bereich des Kunstharzaustritts, der schon vor dem Loslassen des Ankers sichtbar war. Die Messung VT6 stellt einen Sonderfall dar, weil sich das ausgetretene Kunstharz auf der Injektionseinheit befindet. Die Injektionseinheit wird nach dem Loslassen zurückgefahren, sodass anschließend kein Kunstharz mehr im Kamerabild zu sehen ist. Dadurch sinkt in Messung VT6 der maximale Graustufenwert kurz nach dem Loslassen auf das Niveau zu Injektionsbeginn.

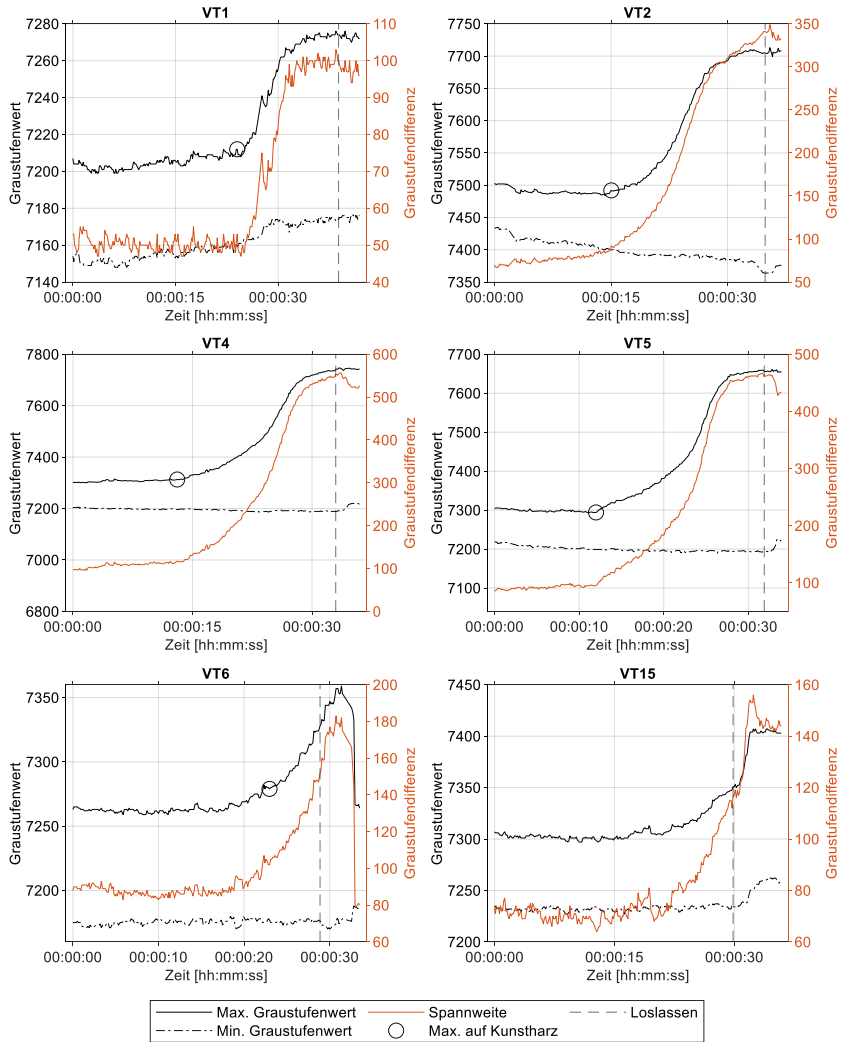


Abbildung 4-24: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite für Messungen mit Kunstharzaustritt, Testmessung (Hinweis: In Messung VT15 ist der Zeitpunkt, wenn der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz liegt, visuell nicht bestimmbar)

Messergebnisse ohne Kunstharzaustritt

In Abbildung 4-25 (oben) ist beispielhaft für Messung VT7 der zeitliche Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite angegeben. Auf der linken y-Achse (schwarz) sind die Graustufenwerte für den minimalen und maximalen Graustufenwert und auf

der rechten y-Achse (orange) ist die Graustufendifferenz für die Spannweite aufgetragen. Die gestrichelte Linie kennzeichnet den Zeitpunkt des Loslassens. Zusätzlich sind in Abbildung 4-25 (unten) die dazugehörigen IR-Bilder 1 bis 4 abgebildet. Die Bildzeitpunkte sind im Verlauf des maximalen Graustufenwerts eingetragen. Die IR-Bilder zeigen jeweils zu einem Zeitpunkt der Kunstharzinjektion einen Bildausschnitt mit eingezeichnetem minimalen (blau) und maximalen (rot) Graustufenwert in der kreisförmigen ROI (gelb).

Der maximale Graustufenwert erhöht sich während des Injektionsvorgangs nicht, sondern nimmt tendenziell ab. Zum Injektionsbeginn liegt der maximale Graustufenwert auf dem Gestein unterhalb der Ankerplatte (siehe Bild 1). Im weiteren Injektionsverlauf wird der maximale Graustufenwert sowohl auf dem Gestein als auch auf der Ankerplatte detektiert. Wie in Kapitel 4.3.2 gezeigt wurde, sind in Messung VT7 die ermittelten Durchschnittswerte für das umgebende Gestein am Anfang etwas höher als für die Ankerplatte, was sich im Verlauf des Arbeitsschrittes jedoch ändert (siehe Abbildung 4-19). Der minimale Graustufenwert bleibt annähernd konstant. Dieser befindet sich bis zum Loslassen durchgängig auf der Injektionseinheit (siehe Bild 1 bis 3). Die Spannweite verringert sich über den Injektionsverlauf. Dies ist auf die Abnahme des maximalen Graustufenwerts zurückzuführen. Die Schwankungen der Spannweitenwerte treten in Abbildung 4-25 besonders hervor. Grund dafür ist, dass die kleinste und größte Spannweite nahe beieinander liegen. Dies wirkt sich auf die Skalierung der rechten y-Achse aus, sodass die kleinen Werteunterschiede zu höheren Ausschlägen im Diagramm führen als in den Messungen mit größeren Werteunterschieden. Auch nach dem Loslassen ist visuell kein Kunstaustritt feststellbar (siehe Bild 4).

In Abbildung 4-26 ist für die weiteren 5 Messungen ohne Kunstharzaustritt der zeitliche Verlauf für die 3 Messgrößen über den Injektionsvorgang abgebildet. In den Diagrammen ist der jeweilige Zeitpunkt des Loslassens gekennzeichnet. Im Gegensatz zu den Messungen mit Kunstharzaustritt erhöht sich in den Messungen ohne Kunstharzaustritt der maximale Graustufenwert nicht über den Injektionsvorgang.

Außerdem wird festgestellt, dass für 5 von 6 Messungen ohne Kunstharzaustritt nach dem Loslassen des Ankers ein sprunghafter Anstieg des maximalen Graustufenwerts und der Spannweite auftritt. Nach der Abkopplung der Injektionseinheit wird der gesamte Ankerkopf im Kamerabild sichtbar. Dabei liegt der maximale Graustufenwert nach dem Loslassen auf der Ankermutter oder in direkter Nähe. Ein Grund dafür kann eine Erwärmung infolge von Reibung durch die Fixierung sein. Eine weitere Möglichkeit ist, dass sich darauf eine kleine Menge an Kunstharz befindet, die nach dem Loslassen erkennbar wird. Allerdings ist für die Bestimmung des Injektionsstopps entscheidend, ob Kunstharz austritt, bevor die Höchstmenge injiziert ist und der Anker losgelassen wird. Daher können für die Entwicklung des thermographischen Ansatzes die Werte nach dem Loslassen des Ankers vernachlässigt werden.

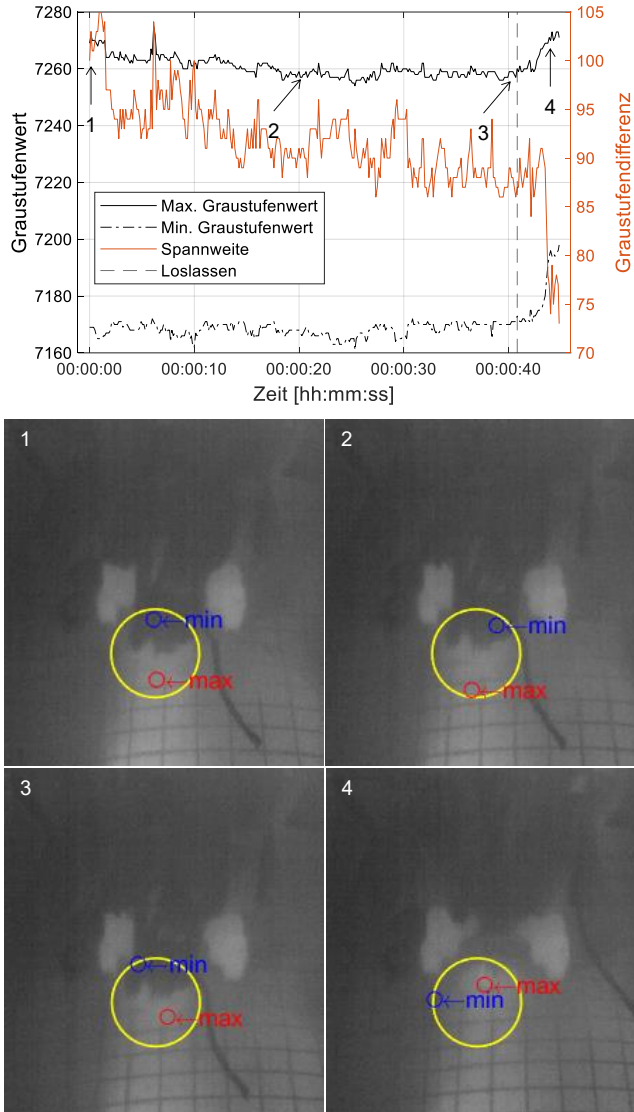


Abbildung 4-25: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite (oben); IR-Bilder 1 bis 4 zu verschiedenen Zeitpunkten des Injektionsvorgangs (unten), Messung VT7 ohne Kunstharzaustritt

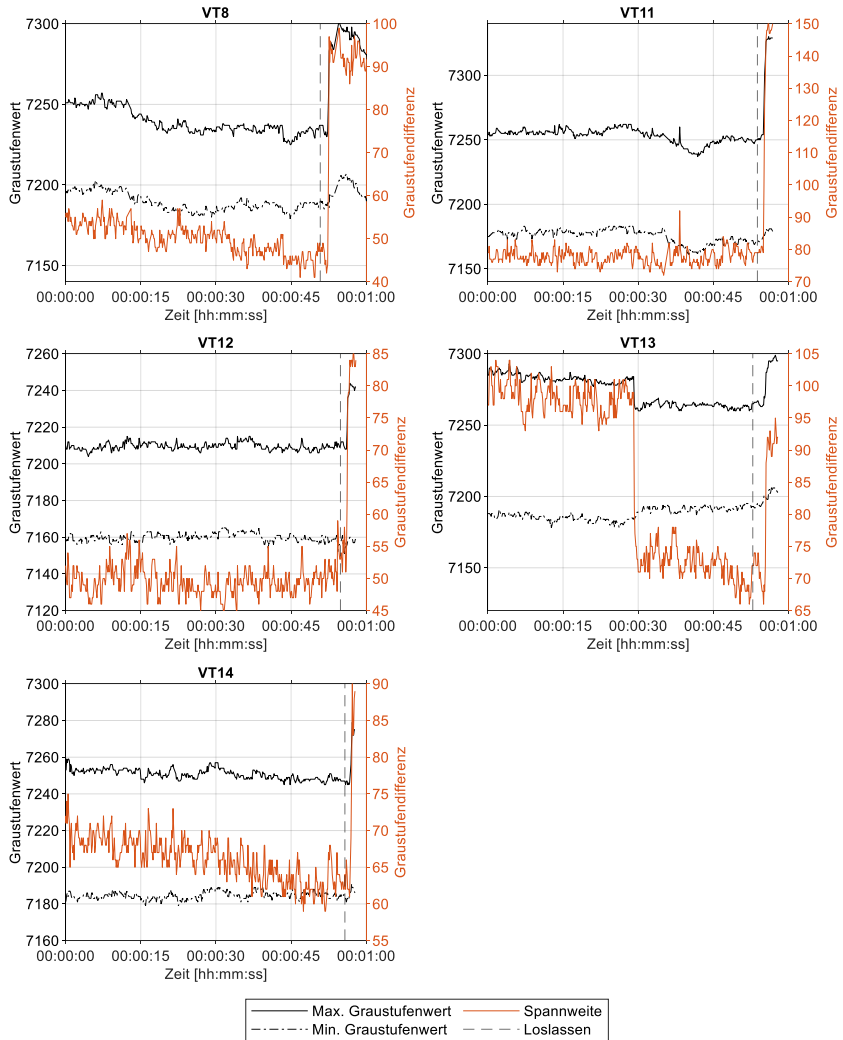


Abbildung 4-26: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite für Messungen ohne Kunstharzaustritt, Testmessung

Vergleichende Betrachtung

Um die drei Messgrößen, minimaler und maximaler Graustufenwert sowie Spannweite, vergleichend zu betrachten, werden zusätzlich die Minimalwertdifferenz, die Maximalwertdifferenz sowie die relative Änderung der Spannweite für die jeweilige Messung ermittelt. Die Minimalwertdifferenz ist definiert als die Differenz aus geringstem und höchstem minimalen

Graustufenwert in einer Messung. Analog beschreibt die Maximalwertdifferenz die Differenz zwischen dem geringsten und höchsten maximalen Graustufenwert in einer Messung. Die relative Änderung der Spannweite wird aus der kleinsten und größten Spannweite in einer Messung berechnet. Die Werte werden global ohne Berücksichtigung der zeitlichen Abfolge im jeweils gewählten ROI-Bereich ermittelt. Dafür werden die IR-Bilder von unmittelbar nach der Ankopplung bis zur Abkopplung der Injektionseinheit an den Anker verwendet. Die ermittelten Werte sind in Anlage 1 und Anlage 2 festgehalten.

In Abbildung 4-27 ist die jeweilige Maximal- und Minimalwertdifferenz für die Messungen mit Kunstharzaustritt dargestellt. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass die Höhe der Maximalwertdifferenz zwischen den Messungen variiert. Die höchste Maximalwertdifferenz weist Messung VT3 mit einem Wert von 814 auf. Dieser Wert ist ca. um den Faktor 15,1 größer als der Wert der Messung VT15 der 54 beträgt. Dabei ergibt sich aus der visuellen Begutachtung der IR-Bilder, dass in den Messungen mit subjektiv höherer Bildqualität die Maximalwertdifferenz höher ist. Daneben wird festgestellt, dass in den Messungen stets der geringste maximale Graustufenwert vor dem Kunstharzaustritt und der höchste maximale Graustufenwert danach auftritt. Für alle Messungen mit Kunstharzaustritt ist die Minimalwertdifferenz kleiner als die dazu gehörige Maximalwertdifferenz. Die größte Minimalwertdifferenz mit einem Wert von 71 weist Messung VT2 auf. Bei den anderen Messungen ist die Minimalwertdifferenz geringer und nimmt Werte von 10 bis 30 an. Die Gründe für den erhöhten Wert bei Messung VT2 sind, dass der minimale Graustufenwert über die Dauer des Injektionsvorgangs abnimmt und zusätzlich zweimal sprunghaft absinkt, was auf kamerainterne Vorgänge schließen lässt (siehe Abbildung 4-24). Die Werte liegen näher zusammen als die Maximalwertdifferenzen. Die größte Minimalwertdifferenz ist mit einem Wert von 71 um den Faktor 7,1 größer als die kleinste Minimalwertdifferenz mit einem Wert von 10. Die Differenz zwischen der jeweiligen Minimal- und Maximalwertdifferenz variiert. Für Messung VT1 ist die Maximalwertdifferenz gegenüber der Minimalwertdifferenz ca. um den Faktor 2,9 größer. Der größte Unterschied, ca. um den Faktor 45,2, liegt für Messung VT3 vor.

Demgegenüber ist in Abbildung 4-28 die jeweilige Minimal- und Maximalwertdifferenz für die Messungen ohne Kunstharzaustritt dargestellt. Im Gegensatz zu den Messungen mit Kunstharzaustritt, liegt für diese Messungen die Maximalwertdifferenz zwischen 11 (Messung VT12) und 33 (Messung VT13). und weist eine kleinere Streuung auf. Zudem liegen die jeweilige Minimal- und Maximalwertdifferenz nahe beieinander. Die Minimalwertdifferenz weist Werte von 10 bis 24 auf. Der größte Unterschied in den Werten kann bei der Messung VT13 und der kleinste bei der Messung VT12 festgestellt werden. So ist für Messung VT13 die Maximalwertdifferenz gegenüber der Minimalwertdifferenz ca. um den Faktor 1,8 größer. Dagegen ist für Messung VT12 die Maximalwertdifferenz ca. um den Faktor 0,8 geringer als die Minimalwertdifferenz.

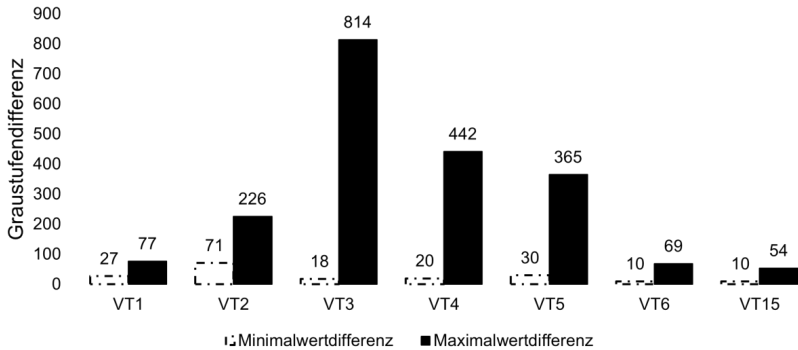


Abbildung 4-27: Übersicht der Minimal- und Maximalwertdifferenz für Messungen mit Kunstharzaustritt, Testmessung

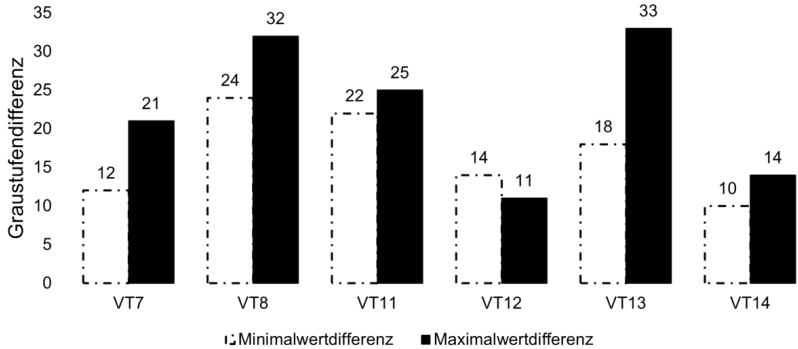


Abbildung 4-28: Übersicht der Minimal- und Maximalwertdifferenz für Messungen ohne Kunstharzaustritt, Testmessung

Der Abbildung 4-29 ist zu entnehmen, dass die relative Änderung der Spannweite für die Messungen mit Kunstharzaustritt höher ist als für die Messungen ohne Kunstharzaustritt. Bei den Messungen mit Kunstharzaustritt beträgt die größte Spannweite teilweise ein Vielfaches der kleinsten Spannweite (siehe Anlage 1). Allerdings fällt auf, dass die Messung VT3 zwar die höchste Maximalwertdifferenz, nicht jedoch die höchste relative Änderung der Spannweite aufweist. Grund dafür ist, dass in diesem Fall die kleinste ermittelte Spannweite mehr als doppelt so hoch ist wie bei den anderen Messungen (siehe Anlage 1). In den IR-Bildern der Messung VT3 ist dies durch einen besonders guten Bildkontrast vor dem Kunstharzaustritt erkennbar. Für die Messungen VT6 und VT15 ist die relative Änderung der Spannweite mit jeweils ca. 83 % am niedrigsten. In diesen Messungen setzt sich der Anstieg des maximalen Graustufenwerts bis zum Loslassen des Ankers fort (siehe Abbildung 4-24). Im Vergleich mit den anderen Messungen mit Kunstharzaustritt wurde die Injektion bei den Messungen VT6 und

VT15 vermutlich am frühesten beendet (siehe Anlage 1). Für 4 von 6 Messungen ohne Kunstharzaustritt ist die relative Änderung der Spannweite negativ, da die größte Spannweite zeitlich vor der kleinsten Spannweite liegt (siehe Anlage 2). In diesen Messungen nehmen der minimale und/oder maximale Graustufenwert während des Injektionsvorgangs tendenziell ab (siehe Abbildung 4-25, Abbildung 4-26). Wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben wurde, ist ein möglicher Grund für das Absinken der Graustufenwerte die Abkühlung der Messszene bzw. die Angleichung der Temperaturen innerhalb der Messszene auf Umgebungstemperatur, da kein Kunstharz austritt. Rausch- und Driftverhalten der eingesetzten Kamera können als weitere Gründe ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

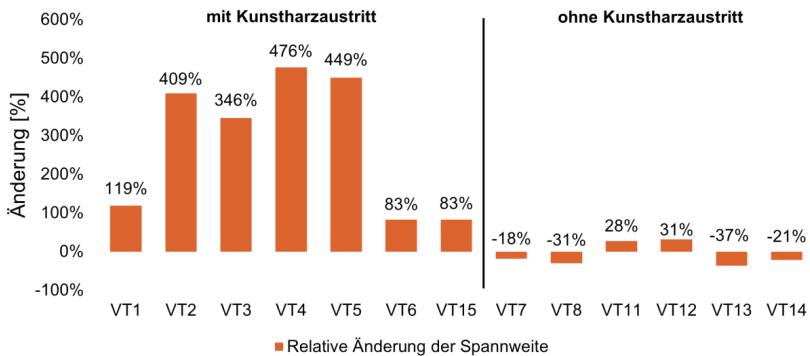


Abbildung 4-29: Übersicht der relativen Änderung der Spannweite für Messungen mit (VT1 bis VT6, VT15) und ohne (VT7 bis VT14) Kunstharzaustritt, Testmessung

Zwischenfazit

Die ausschließliche Betrachtung des maximalen Graustufenwerts, kann bei sinkenden Werten zu einer verspäteten und bei steigenden Werten zu einer irrtümlichen Erkennung von Kunstharz führen. Die Spannweite liefert als einzige Messgröße eine zuverlässige Aussage. Während die anderen Messgrößen Schwankungen unterliegen, werden diese bei der Spannweite größtenteils kompensiert. Im Folgenden wird daher die Spannweite als maßgebliches Kriterium zur Kurzharzerkennung betrachtet.

Die Angabe eines absoluten Grenzwerts für die Spannweite, bei dessen Überschreitung auf ein Kunstharzaustritt geschlossen werden kann, ist nicht anwendbar. Der Wertebereich, in dem die Spannweite liegt, variiert sowohl vor als auch nach dem Kunstharzaustritt innerhalb der Messungen. Daher wird in dieser Arbeit zur Erkennung von austretendem Kunstharz die prozentuale Veränderung der Spannweite während des Injektionsvorgangs betrachtet und ein relativer Grenzwert festgesetzt. Der Ansatz zur Kunstharzerkennung wird in Kapitel 4.4 detailliert vorgestellt.

4.4 Vorstellung des Ansatzes zur Kunstharzerkennung

Der Ansatz zur Kunstharzerkennung basiert auf den in Kapitel 2.4 festgelegten Anforderungen und den in Kapitel 4.3 beschriebenen Untersuchungsergebnissen zum Kunstharzaustritt. Die Ergebnisse aus Kapitel 4.3.4 zeigen, dass die alleinige Überwachung des maximalen Graustufenwerts aufgrund der möglichen Schwankungen im Verlauf nicht ausreichend zuverlässig ist. Daher beruht der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz auf der Überwachung der Spannweite. In Abbildung 4-30 ist der entwickelte Ansatz zur thermographischen Kunstharzerkennung schematisch dargestellt. Die Umsetzung des Algorithmus erfolgte unter Anwendung der Software MATLAB.

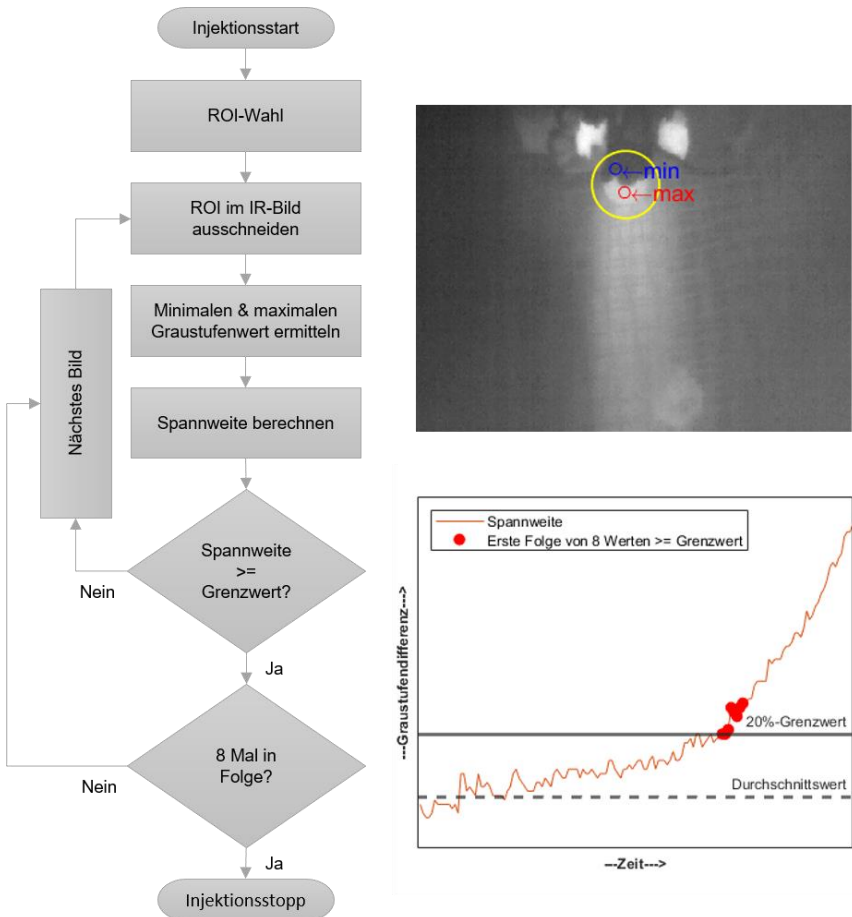


Abbildung 4-30: Schematische Darstellung des Ansatzes zur Kunstharzerkennung

Zum Injektionsstart wird die Position der kreisförmigen ROI im Vollbild ausgewählt, die in allen nachfolgenden IR-Bildern unverändert bleibt. Die ROI-Wahl erfolgt in dieser Arbeit manuell. Für eine Anwendung im größeren Maßstab sollte die ROI-Wahl automatisch durchgeführt werden. Anschließend wird im aktuellen IR-Bild die kreisförmige ROI ausgeschnitten. Die kreisförmige ROI umfasst die Ankerplatte, einen Teil der Injektionseinheit und das an die Ankerplatte angrenzende Gestein. Dadurch werden andere Objekte ausgeschlossen, die sich durch hohe Strahlungsemissionen störend auf die Detektion auswirken könnten.

Als Nächstes wird der minimale und maximale Graustufenwert innerhalb der ROI im aktuellen IR-Bild ermittelt und daraus die Spannweite berechnet. Die Untersuchungsergebnisse aus Kapitel 4.3.4 zeigen, dass die Spannweite bei einem Kunstharzaustritt stark ansteigt. Für die Spannweite wird ein relativer Grenzwert festgelegt, bei dessen Erreichung auf einen Kunstharzaustritt geschlossen werden kann. Dieser beträgt im Rahmen dieser Arbeit 20 %. Die Berechnung des relativen Grenzwerts erfolgt auf Basis eines arithmetischen Durchschnittswerts, der anhand der Spannweitenwerte der ersten 32 IR-Bilder einer Messung ermittelt wird. Bei einer durchschnittlichen Bildrate von 8 Bildern pro Sekunde, entspricht dies ca. 4 s. Die IR-Bilder aus diesem Zeitraum sind für diesen Zweck geeignet, da in dieser Zeit gewöhnlich kein Kunstharz austritt. In Ausnahmefällen kann Kunstharz in den ersten Sekunden der Injektion austreten, wenn z. B. Leckagen auftreten. Dann gilt es zu prüfen, ob die Injektion abgebrochen oder fortgesetzt werden sollte. Auch kann eine Mindestinjektionsmenge festgelegt werden, um eine korrekte Ankerinstallation zu gewährleisten. Grundsätzlich sollte der Durchschnittswert auf Plausibilität geprüft werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, den Durchschnittswert direkt nach der Ankopplung der Injektionseinheit an die Ankerstange zu ermitteln, bevor die Injektion startet. Diese Vorgehensweise wird hier verwendet, da für diese Arbeit der Zeitraum zwischen Ankopplung und Injektionsstart nicht bekannt ist.

Um Fehldetektionen zu vermeiden, muss der Grenzwert mindestens 8 Mal in Folge erreicht oder überschritten werden. Dies entspricht einem Zeitraum von ca. 1 s. Wird der Grenzwert mindestens 8 Mal nacheinander erreicht oder überschritten, wird davon ausgegangen, dass Kunstharz ausgetreten ist. Die Injektion kann gestoppt werden. Ansonsten erfolgt der Injektionsstopp, wenn die Maximalmenge injiziert ist.

In dieser Arbeit wird ein relativer Grenzwert gewählt, da die Angabe eines absoluten Grenzwerts nicht ausreichend robust ist. Der Grund dafür ist, dass der Wertebereich, in dem die Spannweiten liegen, sowohl zum Injektionsstart als auch zum Injektionsende, für die Messungen variieren kann. Durch den relativen Grenzwert wird die Anwendbarkeit bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen verbessert. Bei der Festlegung des relativen Grenzwerts wird berücksichtigt, dass einerseits austretendes Kunstharz frühzeitig erkannt und andererseits

falsch positive Ergebnisse vermieden werden sollen. Eine Bildverarbeitung wird nicht durchgeführt, um die Graustufenwerte und damit die darin enthaltenden Informationen nicht zu verändern.

Mit dem vorgestellten Algorithmus kann die Detektion für alle 7 Messungen mit Kunstharzaustritt aus der Testmessung realisiert werden. In Tabelle 4-3 sind die ermittelten Zeiten zwischen der Sichtung des maximalen Graustufenwerts auf dem Kunstharz und der Erreichung des 20%-Grenzwerts sowie zwischen der Erreichung des 20%-Grenzwerts und dem Loslassen des Ankers aufgelistet. Die angegebene Zeit zur Grenzwerterreicherung bezieht sich auf den achten Spannweitenwert in Folge.

Tabelle 4-3: Übersicht über die ermittelten Zeiten für die Messungen mit Kunstharzaustritt, Testmessung

Messung	Max. auf Kunstharz bis Erreichung 20%-Grenzwert	Erreichung 20%-Grenzwert bis Loslassen Anker
VT1	4 s	10 s
VT2	1 s	18 s
VT3	2 s	16 s
VT4	2 s	17 s
VT5	1 s	18 s
VT6	1 s	4 s
VT15	nicht bestimmbar	3 s

Die Ergebnisse der Messungen mit Kunstharzaustritt zeigen, dass der 20%-Grenzwert stets erreicht wird, bevor die Ankerstange losgelassen wird. Bei den Messungen VT6 und VT15 ist die Zeitdifferenz zwischen Grenzwerterreicherung und Loslassen des Ankers mit 4 s und 3 s kürzer als bei den anderen Messungen. Der Anstieg der Spannweite und des maximalen Graustufenwerts setzt sich in den zwei Messungen bis zum Loslassen fort. Auch ist hier die relative Änderung der Spannweite mit jeweils ca. 83 % am niedrigsten (siehe Abbildung 4-29). Die Messung VT1 weist ebenfalls eine kleinere Zeitdifferenz von 10 s zwischen Grenzwerterreicherung und Loslassen des Ankers auf. Die relative Änderung der Spannweite ist mit ca. 119 % um einen Faktor 3 bis 4 niedriger als bei den Messungen VT2 bis VT5 (siehe Abbildung 4-29). Im Gegensatz zu den Messungen VT6 und VT15, wird in Messung VT1 die Ankerstange erst losgelassen, nachdem der Anstieg der Spannweite beendet ist. In den restlichen Messungen wird die Ankerstange zwischen 16 s und 18 s nach Grenzwerterreicherung losgelassen.

Der 20%-Grenzwert wird unmittelbar nachdem der maximale Graustufenwert auf dem austretenden Kunstharz liegt erreicht. Dies verdeutlicht, dass die chemische Reaktion der Kunstharzkomponenten mit hoher Geschwindigkeit abläuft, wobei ein hoher Betrag an Wärmeenergie freigesetzt wird. Besonders hervorzuheben ist, dass dieser Ansatz auch bei geringer Bildqualität erfolgreich eingesetzt werden kann. In Messung VT15 ist der Bildkontrast zu gering, um visuell zu bestimmen, ab wann der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz liegt. Dennoch wird mittels des vorgestellten Algorithmus der Kunstharzaustritt erfolgreich detektiert.

Mit dem vorgestellten Algorithmus tritt bei keiner der 6 Messungen ohne Kunstharzaustritt ein falsch positives Ergebnis auf. Bei 4 von 6 Messungen liegt eine negative relative Änderung der Spannweite vor. Dagegen beträgt die relative Änderung der Spannweite bei Messung VT11 ca. 28 % und bei Messung VT12 ca. 31 % (siehe Abbildung 4-29). Der 20%-Grenzwert wird dabei nicht erreicht oder überschritten. In diesem Kontext ist zu beachten, dass bei der Bestimmung der relativen Änderung der Spannweite der größte und der kleinste Wert in Relation gesetzt werden. Dagegen bezieht sich der 20%-Grenzwert auf den gemittelten Wert aus den ersten 32 Spannweiten.

Nach dem Loslassen wird der komplette Ankerkopf sichtbar. Bei 4 von 6 Messungen ohne Kunstharzaustritt wird dann der 20%-Grenzwert mindestens kurzzeitig erreicht. Für diese Messungen liegt der maximale Graustufenwert auf der nun sichtbaren Ankermutter oder in direkter Nähe. Zu diesem Zeitpunkt ist der Arbeitsschritt abgeschlossen. Für die Bestimmung des optimalen Zeitpunkts für den Injektionsstopp sind allerdings nur Grenzwerterreichungen relevant, die vor der Injektion der maximalen Kunstharzmenge detektiert werden.

5 Validierung des Ansatzes zur Kunstharzerkennung

Um den entwickelten Ansatz zu erproben, wurde eine Validierungsmessung im LKAB Eisenerzbergwerk Kiruna durchgeführt. Dabei wurden für die Ankerinstallation derselbe Ankerbohrwagen und das gleiche Kunstharzprodukt wie zuvor in der Testmessung verwendet. Als Sensor kam das Nachfolgemodell des Tau2 Kamerakerns, der Boson Kamerakern, zum Einsatz. Dadurch konnte auch die Anwendung des Ansatzes mit einem anderen Kameramodel geprüft werden.

Die Validierungsmessung erfolgte an drei aufeinander folgenden Tagen während der Fröschicht. Dabei wurde in zwei Strecken geankert. Die erste Strecke befand sich in einer Teufe von 1108 m und die zweite Strecke in einer Teufe von 1194 m. Das IR-Kamerasystem wurde wie in der Testmessung im vorderen Bereich des Bohrrams auf demselben Stahlbügel über der Bohrlafette angebracht. Der Boson Kamerakern ermöglichte durch seine geringen Abmessungen den Einsatz eines kleineren Gehäuses, wodurch die Anforderungen an Integrierbarkeit noch besser erfüllt wurden. Eine Evaluation der in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Mensch-Maschine-Schnittstelle war nicht Bestandteil dieser Untersuchung. Infolge unzureichender Anschlussmöglichkeiten auf dem Ankerbohrwagen war eine Abstimmung zwischen Saugleistung und Wasserdruck des Reinigungsaufsatzes nicht möglich. Um das Öffnungsfenster des IR-Kamerasystems sauber zu halten, wurde bei Bedarf manuell Wasser zur Reinigung zugeführt.

Erfassung von Prozessgrößen und Umgebungsbedingungen

Neben dem Ziel der Validierung des entwickelten Ansatzes, bot die zweite Messung die Möglichkeit, potenzielle Einflussgrößen auf die Kunstharzerkennung zu erfassen. Daher wurden die Injektionszeit, die injizierte Kunstharzmenge und die Kunstharztemperatur für alle installierten Anker sowie die Umgebungstemperatur, die Oberflächentemperatur des Gesteins und die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb der zwei Strecken erfasst.

Die Injektionszeit wurde mit einer Stoppuhr manuell ermittelt. Der Injektionsvorgang wurde durch die bedienende Person nach der Ankopplung der Injektionseinheit an die Ankerstange gestartet. Trat während des Injektionsvorgangs kein Kunstharz aus, wurde die festgelegte Höchstmenge eingebracht. Die injizierte Kunstharzmenge und die aktuelle Temperatur der Kunstharzkomponenten in den Behältern auf dem Ankerbohrwagen wurden vom Anzeigemonitor abgelesen. Die Temperatur der Kunstharzkomponenten lag stets leicht über der gemessenen Umgebungstemperatur. Für die Kunstharzkomponenten wurden in der ersten Strecke (Messtag 1 und 2) Temperaturen zwischen 16,4 °C und 17,9 °C und in der zweiten Strecke

(Messtag 2 und 3) Temperaturen zwischen 18,1 °C und 20,1 °C gemessen. Am zweiten Messtag wurde in die zweite Strecke gewechselt und am längsten von allen drei Messtagen gemessen. Insgesamt wurde am zweiten Messtag der größte Temperaturunterschied von 2,9 °C (Start: 16,7 °C, Ende: 19,6 °C) für Komponente A und 3,7 °C (Start: 16,4 °C, Ende: 20,1 °C) für Komponente B protokolliert. Die Kunstharztemperatur war innerhalb derselben Strecke zu einem späteren Zeitpunkt während einer Schicht gleich groß oder minimal höher (unter 0,5 °C). Während der Pausen oder längerer Unterbrechungen wurde der Ankerbohrwagen abgeschaltet. Die leichte Erhöhung der Temperatur kann auf die Abwärme des Ankerbohrwagens zurückgeführt werden.

Während der Validierungsmessung wurde die Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit mittels eines Hygrometers in den zwei geankerten Strecken mehrmals in einer Schicht gemessen. Die gemessene Umgebungstemperatur war für beide Strecken ähnlich und betrug 15,1 °C bis 16,3 °C. Die relative Luftfeuchtigkeit war in der zweiten Strecke mit über 90 % deutlich höher als in der ersten Strecke, wo diese in einem Bereich um 50 % schwankte.

Die Temperaturmessung der Gesteinsoberfläche erfolgte punktuell mittels eines Kontaktthermometers und eines Pyrometers. Dabei wurde festgestellt, dass die Oberflächentemperatur des Gesteins innerhalb eines Streckenabschnitts um wenige Grad Celsius variieren kann. Dies zeigten sowohl die Messungen mit dem Kontaktthermometer als auch mit dem Pyrometer, wenn auch die absoluten Werte nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Vorwiegend lagen die Gesteinsoberflächentemperaturen nahe der gemessenen Umgebungstemperatur.

Einteilung der Messungen in Kategorien

Insgesamt wurden während der Validierungsmessung 56 Anker installiert. Dabei wurden 25 Anker in der ersten Strecke und 31 Anker in der zweiten Strecke eingebracht. Die Injektionsvorgänge wurden als einzelne Messungen erfasst. Die Messungen wurden anhand der drei Messtage mit A, B, C und einer fortlaufenden Nummer benannt. Kunstharz trat bei 16 Messungen aus. Bei 40 Messungen trat kein Kunstharz aus. Ein Grund dafür, dass nur bei wenigen Ankerungen Kunstharz austrat, waren die gegebenen Gebirgsbedingungen, die durch viele Wegigkeiten für das Kunstharz gekennzeichnet waren. Bei einigen der installierten Anker kam es zu Abweichungen vom üblichen Injektionsablauf. Dazu zählte das Auftreten von Leckagen, eine irrtümliche Abschaltung der Injektion oder die Deaktivierung der automatischen Abschaltung bei Erreichung der festgelegten Maximalmenge an Kunstharz.

Die 16 Messungen mit Kunstharzaustritt wurden abhängig von der Sichtbarkeit des Kunstharzaustritts in den IR-Bildern sowie dem Injektionserfolg in 3 Kategorien eingeteilt. In den Messungen der Kategorie 1 wurde der Kunstharzaustritt während der Injektion in den IR-Bildern sichtbar (6 Messungen) und die Injektion von der bedienenden Person manuell gestoppt. Wenn der Kunstharzaustritt erst nach dem Loslassen des Ankers in den IR-Bildern erkennbar

war, wurden die Messungen der Kategorie 2 zugeordnet (3 Messungen). Dabei ist zu beachten, dass die bedienende Person einen Kunstharzaustritt visuell erkannte und die Injektion manuell beendete. Die Kategorie 3 umfasst Messungen, bei denen Leckagen oder Störungen bzw. Defekte auftraten (7 Messungen) und die mehrheitlich aus der Installation von Testankern stammten. Mit Ausnahme der Messung B13 wurde in diesen Messungen austretendes Kunstharz erst in den IR-Bildern sichtbar, nachdem die Ankerstange losgelassen und der Ankerkopf nicht mehr durch die Injektionseinheit verdeckt wurde.

Die Sichtbarkeit des Kunstharzaustritts in den IR-Bildern wird davon beeinflusst, in welchem Bereich der Strecke geankert wird. Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, kann die Sicht auf das austretende Kunstharz durch im vorderen Bereich liegende Maschinenteile eingeschränkt sein. Bei der Ankerinstallation in den linksseitigen Stoß ist der Blick auf den zu installierenden Anker am besten, da der Wandpuffer oben und die IR-Kamera unten angeordnet ist (siehe Abbildung 4-5). Beim rechtsseitigen Stoß ist die Anordnung genau umgekehrt. Aus Kategorie 1 wurden 5 der 6 Anker in den linken Stoß gesetzt. Die Ausnahme bildete Messung C5 mit der Installation in den rechten Stoß. Im Gegensatz dazu wurden alle Anker in den Messungen der Kategorie 2 in den rechten Stoß installiert. In den Messungen der Kategorie 3 wurden, mit Ausnahme der Messungen B13 und C1, die Anker ebenfalls in den rechten Stoß eingebracht. Bei den anderen beiden Messungen erfolgte die Installation in die Firste.

5.1 Untersuchungen zum minimalen und maximalen Graustufenwert sowie der Spannweite

Vor der Anwendung des Algorithmus auf den Datensatz aus der Validierungsmessung wurde die Entwicklung des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite betrachtet.

Die Ermittlung dieser Messgrößen erfolgte innerhalb einer kreisförmigen ROI und in analoger Weise wie für den Datensatz aus der Testmessung. Eine Anpassung der kreisförmigen ROI war erforderlich, da das eingesetzte Kameramodell ein anderes Sichtfeld als das Vorgängermodell hat. Der eingesetzte Boson Kamerakern bietet ein Sichtfeld von $50^\circ \times 40^\circ$ und erfasst bei gleicher Auflösung einen kleineren Bereich der Szene als das Vorgängermodell. Dadurch nehmen die Ankerplatte und weitere Bildobjekte einen größeren Bildbereich ein. Bei der Anpassung der Größe der ROI wurde darauf geachtet, dass die kreisförmige ROI ungefähr den gleichen Bereich um die Ankerplatte umfasst. Deshalb beträgt der Durchmesser der ROI 74 Pixel anstatt 60 Pixel.

In Abbildung 5-1 ist für die 6 Messungen der Kategorie 1 der zeitliche Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite über den Injektionsvorgang dargestellt. In den Diagrammen sind auf der linken y-Achse (schwarz) die Graustufenwerte für den

minimalen und maximalen Graustufenwert aufgetragen. Auf der rechten y-Achse (orange) ist die Graustufendifferenz für die Spannweite abgebildet. Die Zeitpunkte, wann der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz liegt sowie die Ankerstange losgelassen wird, sind gekennzeichnet.

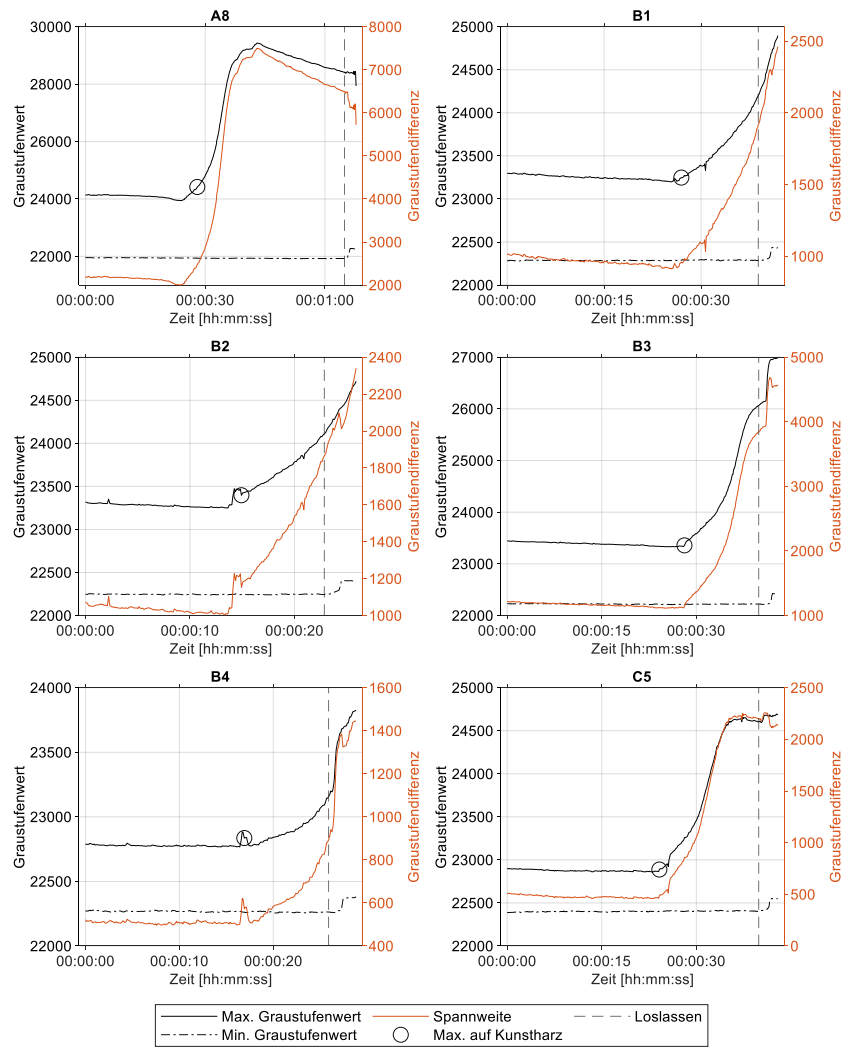


Abbildung 5-1: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite, Messungen der Kategorie 1

Die abgebildeten Messungen haben alle gemeinsam, dass, unmittelbar nachdem austretendes Kunstharz in den IR-Bildern erkennbar wird, der maximale Graustufenwert ansteigt. In den Messungen A8, B3 und C5 der Kategorie 1 ist der Anstieg des maximalen Graustufenwerts vollständig oder nahezu beendet. Dies trifft auch auf die Spannweite zu. Dabei ist anzumerken, dass in Messung A8 die Injektion trotz eines Kunstharzaustritts fortgesetzt wurde. Der Grund dafür lag in der geringen Menge an ausgetretenem Kunstharz und dem frühen Zeitpunkt des Austritts. Im Verlauf der Messung A8 ist erkennbar, dass der maximale Graustufenwert bis zu einem Höchstwert steigt und dann wieder sinkt. Jedoch erfolgt das Absinken mit geringerer Geschwindigkeit als der Anstieg. Für die Messungen B1, B2 und B4 der Kategorie 1 wird festgestellt, dass in diesen bis zum Loslassen des Ankers der maximale Graustufenwert ansteigt. Gleiches gilt für die Spannweite. In diesen Messungen erhöht sich der maximale Graustufenwert auch nach dem Loslassen, wobei dieser teilweise auf dem erst nach dem Loslassen sichtbar gewordenen Kunstharz liegt (B2 und B4).

Zusätzlich ist in Tabelle 5-1 eine Übersicht über die Injektionszeit, die relative Änderung der Spannweite und den Spannweitenanstieg für die Messungen der Kategorie 1 gegeben. Die relative Änderung der Spannweite wird aus der kleinsten und größten Spannweite über den Verlauf einer Messung innerhalb der ROI berechnet. Bis zum Zeitpunkt des Loslassens beträgt die relative Änderung der Spannweite in den Messungen mit anhaltendem Anstieg ca. 80 % (B4), 86 % (B2) und 110 % (B1) und in den Messungen mit beendetem Anstieg ca. 245 % (B3), 275 % (A8) und 393 % (C5). Damit ist die relative Änderung der Spannweite bei den Messungen mit beendetem Anstieg mehr als doppelt so hoch wie bei den Messungen mit anhaltendem Anstieg.

Tabelle 5-1: Übersicht über die Injektionszeit, die relative Änderung der Spannweite und den Spannweitenanstieg, Messungen der Kategorie 1

Messung	Injektionszeit	Rel. Änderung der Spannweite	Spannweitenanstieg
A8*	52 s	275 %	beendet
B1	12 s	110 %	anhaltend
B2	14 s	86 %	anhaltend
B3	29 s	245 %	beendet
B4	8 s	80 %	anhaltend
C5	25 s	393 %	beendet

* Maximalmenge deaktiviert, Kunstharzaustritt ist nach einer Injektionszeit von ca. 25 s sichtbar

Der Reaktionsfortschritt zum Zeitpunkt des Kunstharzaustritts hat einen direkten Einfluss auf die Höhe und den Verlauf der gemessenen Graustufenwerte. Dies ist eine mögliche Erklärung,

warum die relative Änderung der Spannweite für die Messungen der Kategorie 1 unterschiedlich groß ist. Bei den Messungen B3 und C5 wurde Kunstharz erst später an der Ankerplatte sichtbar. Die Reaktion der Kunstharzkomponenten ist daher schon weiter fortgeschritten. In diesen Messungen mit beendetem Anstieg ist die Injektionszeit mit 29 s (B3) und 25 s (C5) ca. doppelt so lang wie in den Messungen mit anhaltendem Anstieg mit 12 s (B1), 14 s (B2) und 8 s (B4). Auch in der Messung A8 trat nach ca. 25 s Injektionszeit Kunstharz an der Ankerplatte aus. Aufgrund der gegebenen Gebirgsbedingungen wurde die Injektion dennoch bis zu einer Injektionszeit von 52 s fortgesetzt.

Wasseraustritt während der Kunstharzinjektion

Während der Validierungsmessung konnte bei einigen eingesetzten Ankern im Verlauf des Injektionsvorgangs ein Austritt von Wasser aus dem Ankerbohrloch beobachtet werden. Laut Aussage der bedienenden Person ist ein Austritt von Restspülwasser während der Kunstharzinjektion in einem ansonsten nicht wasserführenden Bereich ein Anzeichen dafür, dass um das Ankerbohrloch keine oder wenige Risse und/oder Hohlräume vorhanden sind. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass vor Erreichen der Maximalmenge Kunstharz aus dem Ankerbohrloch austritt. Je nach Abstand und Winkel zum Anker besteht bei der visuellen Erkennung für die bedienende Person Verwechslungsgefahr zwischen Wasser- und Kunstharzaustritt, so dass die Injektion irrtümlicherweise zu früh gestoppt werden könnte. Diese Gefahr kann auch bei bildgebenden Messverfahren bestehen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass mittels des entwickelten Ansatzes zuverlässig zwischen einem Wasser- und einem Kunstharzaustritt unterschieden werden kann.

Überwiegend ist in den Messungen mit beobachteten Wasseraustritt während des Austrittszeitraums der maximale Graustufenwert annähernd konstant oder nimmt tendenziell ab. Allerdings kann austretendes Wasser zu einer kurzzeitigen Erhöhung des maximalen Graustufenwerts und der Spannweite führen. In Abbildung 5-2 ist der zeitliche Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite für Messung A4 dargestellt. Vor dem Wasseraustritt liegt der maximale Graustufenwert auf der Ankerplatte, währenddessen im Bereich des austretenden Wassers und kurze Zeit danach wieder auf der Ankerplatte. Dabei unterscheidet sich der Verlauf des maximalen Graustufenwerts und der Spannweite bei einem Wasseraustritt von einem Kunstharzaustritt. Bei einem Kunstharzaustritt erhöhen sich ab dem Zeitpunkt der Sichtbarkeit des Kunstharzes die Werte über mehrere Sekunden (siehe Abbildung 5-1). Im Unterschied dazu steigen bei einem Wasseraustritt die Werte sprunghaft an. Anschließend liegen die Werte für kurze Zeit in einem höheren Wertebereich und fallen dann wieder abrupt ab. Im nachfolgenden Kapitel 5.2 wird gezeigt, dass für die in Abbildung 5-2 dargestellte Messung A4 der 20%-Grenzwert im Zeitraum des Wasseraustritts nicht erreicht oder überschritten wird.

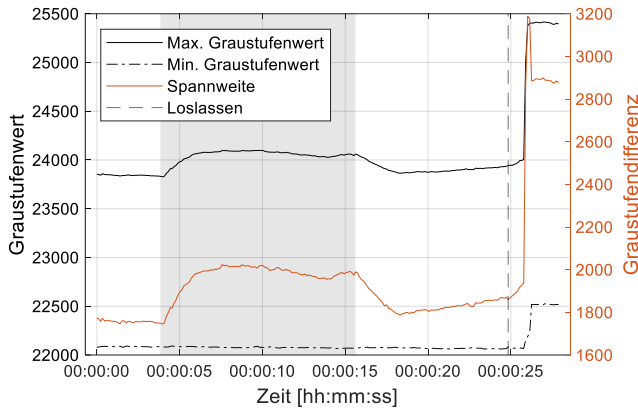


Abbildung 5-2: Zeitlicher Verlauf des minimalen und maximalen Graustufenwerts sowie der Spannweite, Messung A4 mit Wasseraustritt (grauer Bereich) der Kategorie 2

5.2 Anwendung des thermographischen Ansatzes

Die Validierung des thermographischen Ansatzes zur Kunstharzerkennung erfolgte anhand ausgewählter Messungen aus der Validierungsmessung, bei denen eine positive relative Änderung der Spannweite eintrat. Dies trifft für alle 6 Messungen der Kategorie 1, alle 3 Messungen der Kategorie 2 und 2 von 7 Messungen der Kategorie 3 zu. Zudem ist für 9 von 40 Messungen ohne Kunstharzaustritt die Änderung der Spannweite positiv. Dabei erstreckt sich der Betrachtungszeitraum jeweils von kurz nach der Ankopplung der Injektionseinheit an den Anker bis unmittelbar vor der Abkopplung.

Für alle Messungen der Kategorie 1 kann mittels des thermographischen Ansatzes der Kunstharzaustritt detektiert werden. Wie in Tabelle 5-2 zu sehen ist, wird der 20%-Grenzwert immer erreicht, bevor der Anker losgelassen wird. An dieser Stelle sei angemerkt, dass bei Messung A8 nach einer Injektionszeit von 25 s Kunstharz sichtbar wurde. Jedoch wurde die Injektion wegen der Gebirgsbedingungen fortgesetzt und betrug insgesamt 52 s. Bei den Messungen B1, B2 und B4 ist die Zeitdifferenz zwischen Grenzwerterreicherung und Loslassen des Ankers am kürzesten. In diesen Messungen hält der Anstieg der Spannweite bis zum Loslassen an (siehe Abbildung 5-1). Auch fällt auf, dass bei den Messungen B1 und B4 der Grenzwert erst 5 s nachdem der maximale Graustufenwert auf dem ausgetretenen Kunstharz liegt erreicht wird. Bei den Messungen B3 und C5 beträgt der Zeitraum zwischen der Erreichung des 20%-Grenzwerts und dem Loslassen 8 s und 13 s. Bei diesen Messungen kann der Anstieg der Spannweite bis zum Loslassen als beendet angesehen werden.

Tabelle 5-2: Übersicht über die ermittelten Zeiten für die Messungen mit Kunstharzaustritt der Kategorie 1, Validierungsmessung

Messung	Injektionszeit	Max. auf Kunstharz bis Erreichung 20%-Grenzwert	Erreichung 20%-Grenzwert bis Loslassen Anker
A8*	52 s	1 s	35 s
B1	12 s	5 s	6 s
B2	14 s	2 s	5 s
B3	29 s	3 s	8 s
B4	8 s	5 s	3 s
C5	25 s	2 s	13 s

* Maximalmenge deaktiviert, Kunstharzaustritt ist nach einer Injektionszeit von ca. 25 s sichtbar

Bei allen 3 Messungen der Kategorie 2 wird das Kunstharz erst nach dem Loslassen des Ankers sichtbar. Mittels des Ansatzes wird in diesen Fällen erst nach dem Loslassen der Grenzwert mindestens 8 Mal in Folge erreicht oder überschritten und somit Kunstharz erkannt. Für diese Messungen ist die relative Änderung der Spannweite bis zum Loslassen des Ankers zwar positiv, jedoch nicht signifikant erhöht und steigt erst danach stark an.

Aus Kategorie 3 wird für 2 Messungen (B13 und C4) der thermographische Ansatz angewendet. Bei Messung B13 lag ein Defekt vor, der zur Lösung der Ankerplatte führte. Hier wird der Kunstharzaustritt ca. 2 s vor dem Herabfallen der Ankerplatte detektiert. In diesem Fall trat Kunstharz zwischen der Injektionseinheit und der Ankerstange aus. Für Messung C4 erfolgt die Detektion erst nach dem Loslassen.

Bei 9 von 40 Messungen ohne Kunstharzaustritt ist die relative Änderung der Spannweite positiv. Auch für diese Messungen kann die Funktion des thermographischen Ansatzes zur Kunstharzerkennung bestätigt werden. Wie bereits bei der Testmessung können falsch positiven Ergebnisse (irrtümliche Kunstharzdetektion) verhindert werden. Von besonderem Interesse sind die Messungen B12 und C9. Bei Messung B12 beträgt die relative Änderung der Spannweite ca. 27 %. Im Verlauf wird der 20%-Grenzwert stellenweise erreicht oder überschritten, jedoch nicht 8 Mal in Folge. Die relative Änderung der Spannweite beträgt bei Messung C9 ca. 22 %. Der 20%-Grenzwert wird dabei nicht erreicht oder überschritten, da er sich, wie in Kapitel 4.4 beschrieben, auf das arithmetische Mittel von 32 Spannweiten bezieht.

Nach dem Loslassen und Sichtbarwerden des gesamten Ankerkopfes wird der Grenzwert bei 6 von 9 Messungen ohne Kunstharzaustritt mindestens kurzzeitig erreicht. Bei 5 von 6 Messungen liegt nach dem Loslassen des Ankers der maximale Graustufenwert auf der Anker Mutter. Bei einer Messung liegt dieser auf dem Bereich der Ankerplatte, der davor verdeckt war. Wie bereits in Kapitel 4.4 erwähnt, ist eine Erreichung des Grenzwerts nach dem Loslassen des Ankers irrelevant, da zu diesem Zeitpunkt der Arbeitsschritt abgeschlossen ist.

6 Bewertung des entwickelten thermographischen Ansatzes zur Kunstharzerkennung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, einen Ansatz für eine sensorbasierte Erkennung eines Kunstharzaustritts zu entwickeln, wodurch eine automatische bedarfsgerechte Kunstharzinjektion ermöglicht wird. Als Sensortechnologie wurde in Kapitel 3 die Infrarotthermographie ausgewählt, wodurch die Vorteile eines bildgebenden Verfahrens und einer Temperaturerfassung kombiniert werden. Am Beispiel eines Zweikomponenten-Kunstharzproduktes wurde der thermographische Ansatz anhand von Daten aus einer Testmessung entwickelt und dessen Eignung zur Kunstharzerkennung mittels Daten aus einer Validierungsmessung demonstriert. Für die in diesem Kapitel durchgeführte ganzheitliche Bewertung des entwickelten Ansatzes wurden die in Kapitel 2.4 aufgestellten Anforderungen herangezogen.

Anforderungskriterium: Genauigkeit

Von dem Ansatz zur Kunstharzerkennung wird eine hohe Genauigkeit gefordert, die durch Sensitivität und Spezifität charakterisiert ist. Um eine hohe Sensitivität zu gewährleisten, muss ein Kunstharzaustritt während des Injektionsvorgangs im Bereich des Ankerkopfes zuverlässig erkannt werden. Gleichzeitig muss für eine hohe Spezifität sichergestellt werden, dass nicht fälschlicherweise auf einen Kunstharzaustritt geschlossen wird, wenn keiner vorliegt. Um den relevanten Bereich vollständig erfassen zu können, wurde das IR-Kamerasystem im vorderen Bereich des Bohrarms über der Bohrlafette positioniert. Aus dieser Position war das Sichtfeld der Kamera auf den zu setzenden Anker und seine unmittelbare Umgebung gerichtet.

Aus den Ergebnissen der Testmessung lässt sich erkennen, dass der im Rahmen dieser Arbeit festgelegte 20%-Grenzwert bei den Messungen mit Kunstharzaustritt stets vor dem Loslassen des Ankers erreicht und somit der Austritt sicher erkannt wird. Für die Auswertung wurden die Daten mit Kunstharzaustritt aus der Validierungsmessung kategorisiert. In Kategorie 1 liegt ein sichtbarer Kunstharzaustritt vor. Bei Kategorie 2 war dieser durch Maschinenteile verdeckt. Kategorie 3 beinhaltet Messungen bei denen Unregelmäßigkeiten beim Ankerbohr- und -setzprozess auftraten. Auf alle Messungen der Kategorie 1 trifft zu, dass austretendes Kunstharz mittels des 20%-Grenzwerts stets vor dem Loslassen des Ankers detektiert wird. Bei den Messungen der Kategorie 2 ist der Kunstharzaustritt erst nach dem Loslassen in den IR-Bildern sichtbar und kann mittels des Ansatzes erst danach erkannt werden. Hier besteht Verbesserungsbedarf, denn ein Austritt von Kunstharz während des Injektionsvorgangs wurde in diesen

Fällen durch die bedienende Person erkannt und die Injektion manuell gestoppt. Bei der Auswertung der Validierungsdaten wurde festgestellt, dass die Sichtbarkeit eines Kunstharzaustritts in den IR-Bildern davon abhängt, in welchem Bereich der Strecke geankert wurde. Insbesondere bei der Ankerinstallation in den rechtsseitigen Stoß, wie es in den Messungen der Kategorie 2 der Fall war, ist aufgrund der Anordnung der Maschinenteile die Kamerasicht eingeschränkt. Daher sollten für den zukünftigen Einsatz Konstruktionslösungen zum Mitdrehen der Kamera, wie eine drehbare Gestaltung des gesamten Bohrarms, einzelner Teile davon oder der Kamerahalterung, evaluiert werden. In der Kategorie 3 sind mehrheitlich Messungen zugeordnet in denen Leckagen oder Störungen bzw. Defekte auftraten. In diesen Fällen ist es nicht möglich, anhand der Erkennung von Kunstharzaustritt auf ein vollständiges, korrektes Verfüllen des Ankerbohrloches zu schließen. Allerdings traten solche Unregelmäßigkeiten überwiegend bei der Installation von Testankern auf, sodass davon ausgegangen werden kann, dass im regulären Betrieb diese Kategorie kleiner ist. Ein Kunstharzaustritt war mehrheitlich erst nach dem Loslassen in den IR-Bildern sichtbar. Dagegen konnte die bedienende Person ein Austritt von Kunstharz bereits während der Injektion erkennen und diese manuell stoppen. Das im Verlauf des Injektionsvorgangs austretende Kunstharz lag außerhalb des Sichtfelds der Kamera. Auch trat in diesen Fällen das Kunstharz zu Beginn der Injektion aus. Für den zukünftigen Einsatz sollte sich die Anwendung des Ansatzes auf die Installation bereits bewährter Anker konzentrieren. Auch ist der Einsatz einer zweiten Kamera denkbar, die in Kabinennähe positioniert ist, um eine andere Sicht auf die Ankerinstallation bieten zu können.

In dieser Arbeit wird die Spezifität höher gewichtet, da es in Bezug auf die Sicherheit kritisch ist, wenn die Injektion zu früh gestoppt wird. Ein vorzeitiger Injektionsstopp und damit verbunden geringere eingebrachte Injektionsmenge kann dazu führen, dass die Verbundwirkung zwischen Anker und Gebirge unzureichend ist und dadurch die volle Tragfähigkeit des Ankers nicht erreicht wird. Bei der Anwendung des Algorithmus auf die Daten der Validierungsmessung traten keine falsch positiven Ergebnisse bzw. irrtümliche Kunstharzdetektionen auf. Bei einigen eingesetzten Ankern der Validierungsmessung konnte ein Wasseraustritt während des Injektionsvorgangs beobachtet werden. Dabei konnte bestätigt werden, dass mittels der Infrarotthermographie eine Unterscheidung zwischen Wasser- und Kunstharzaustritt möglich ist. Die Unterscheidung basiert dabei auf dem Temperaturunterschied zwischen Wasser und Kunstharz aufgrund der exothermen Reaktion und ist ein entscheidender Vorteil der Kombination aus Bilderkennung und Temperaturmessung. Mittels des entwickelten Ansatzes wurde für keine der betrachteten Messungen aus der Validierungsmessung austretendes Wasser mit Kunstharz verwechselt. Sofern innerhalb der Messungen durch Wasseraustritt eine Erhöhung des maximalen Graustufenwerts auftrat, lag diese unterhalb des festgelegten 20%-Grenzwerts. Für den Fall, dass das austretende Wasser eine deutlich höhere Temperatur und

dadurch eine höhere Strahlungsintensität hätte, wäre eine Möglichkeit einen Wasseraustritt von einem Kunstharzaustritt durch eine Auswertung des Steigungsverlaufs zu unterscheiden. Bei einem Kunstharzaustritt ist für eine gewisse Zeit durch die Erhöhung des maximalen Graustufenwerts aufgrund der stattfindenden exothermen Reaktion eine anhaltende positive Steigung zu erwarten. Dagegen ist bei einem Wasseraustritt diese nur kurzzeitig positiv und danach ungefähr null, da keine weitere Temperaturerhöhung stattfindet (siehe Abbildung 5-2).

Bei visueller Begutachtung der Daten aus der Testmessung wurde festgestellt, dass die Bildqualität stark variiert. Dies führt dazu, dass für das menschliche Auge austretendes Kunstharz in den IR-Bildern unterschiedlich gut erkennbar ist. Zudem wirkt sich die Bildqualität auch auf die Größe der ermittelten minimalen und maximalen Spannweite für die Messungen aus. Der zeitliche Verlauf der Spannweite ist für die Messungen VT1 bis VT5 ähnlich (beendeter Anstieg), weswegen sich diese besonders gut für einen Vergleich eignen. In den Messungen VT2, VT4 und VT5 mit subjektiv geringerer Bildqualität als in Messung VT3 ist die maximale Spannweite zwar kleiner, jedoch ist in diesen Messungen auch die minimale Spannweite deutlich kleiner. Dadurch ist die relative Änderung der Spannweite trotzdem hoch und vergleichbar mit der Messung VT3 mit subjektiv besserer Bildqualität (siehe Abbildung 4-29). Auch zeigt sich anhand der Messung VT1, dass der Algorithmus bei einer visuell als schlecht eingestuften Bildqualität in der Lage ist, den Kunstharzaustritt zu erkennen. Hierbei ist jedoch die relative Änderung der Spannweite deutlich kleiner als bei den oben aufgeführten Messungen. Bei Messung VT15 ist die Bildqualität so gering, dass eine exakte Bestimmung des Austrittszeitpunkts bei der visuellen Betrachtung nicht möglich ist. Dennoch wurde durch Anwendung des Algorithmus austretendes Kunstharz korrekt erkannt. Daraus lässt sich ableiten, dass Unterschiede in der Bildqualität bis zu einem gewissen Grad durch den relativen Ansatz kompensiert werden können und die Genauigkeit nicht einschränken. Auch wenn die Erkennung trotz variierender Bildqualität in den Messungen aus der Testmessung erfolgreich war, ist davon auszugehen, dass bei einer weiteren Verschlechterung der Bildqualität auch die Genauigkeit beeinträchtigt werden kann. Zudem kann sich eine schlechte Bildqualität negativ auf die Geschwindigkeit der Erkennung auswirken. Daher ist ein geeignetes Schutz- und Reinigungskonzept dennoch zwingend erforderlich.

Anforderungskriterium: Geschwindigkeit

Die in dieser Arbeit angestrebte Zeitdauer von 2 s für die Erkennung eines Kunstharzaustritts, wird bei 5 von 7 Messungen mit Kunstharzaustritt aus der Testmessung erreicht. Für Messung VT15 aus der Testmessung ist eine Bestimmung der Detektionszeit nicht möglich, weil aufgrund der schlechten Sichtbarkeit in den IR-Bildern eine Aussage zum Zeitpunkt, ab wann der maximale Graustufenwert auf dem Kunstharz liegt, nicht getätigt werden kann. Dabei sei angemerkt, dass mittels des entwickelten Ansatzes auch in diesem Fall der Kunstharzaustritt vor dem Loslassen des Ankers erkannt wird. Für Messung VT1 aus der Testmessung beträgt die

Dauer für die Kunstharzerkennung 4 s. Allerdings wird angenommen, dass die Bildaufnahme wenige Minuten nach dem Kamerastart erfolgte, was sich möglicherweise negativ auf die Erkennung ausgewirkt hat. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen aus Kapitel 4.2 zeigen für das Nachfolgemodell, dass die Kamera eine Aufwärmphase hat. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass auch beim während der Testmessung eingesetzten Vorgängermodell eine Aufwärmphase existiert. Die Bildaufnahme sollte erst nach Einhaltung einer Aufwärmzeit der Kamera starten, um eine Beeinflussung durch Aufwärmvorgänge zu verhindern.

Die Ergebnisse der Messungen der Kategorie 1 aus der Validierungsmessung zeigen, dass bei 3 von 6 Messungen die angestrebte Zeitdauer von 2 s erzielt wird. Die Zeit wird mit jeweils 5 s bei den Messungen B1 und B4 sowie mit 3 s bei Messung B3 überschritten. Folgende Maßnahmen sind möglich, um die Zeit für die Kunstharzerkennung zu reduzieren:

1. Eine Absenkung des relativen Grenzwerts für die Spannweite. Dabei ist darauf zu achten, dass die Spezifität nicht abnimmt.
2. Einsatz einer Kamera mit höherer Bildrate. Im Algorithmus ist die Vorgabe, dass für einen Austritt 8 Mal hintereinander der Grenzwert erreicht werden muss. Die Bildrate der eingesetzten Kameras beträgt durchschnittlich 8 Bilder pro Sekunde, wodurch mittels des entwickelten Ansatzes mindestens 1 s benötigt wird bis ein Kunstharzaustritt zurückgemeldet wird. Weiterhin besteht grundsätzlich die Möglichkeit die geforderte Anzahl von Grenzwerterreichungen in Folge zu reduzieren. Dadurch steigt jedoch die Gefahr von Fehldetektionen.

Ein etwaiges Potenzial der vorgestellten Maßnahmen ist durch umfangreiche Validierungen zu evaluieren.

Anhand der Datensätze aus der Test- und der Validierungsmessung wird festgestellt, dass sich bei einigen Messungen der Anstieg der Spannweite bis zum Loslassen fortsetzt. Bei anderen Messungen endet der Anstieg der Spannweite bereits zuvor. Tendenziell ist die relative Änderung der Spannweite bei den Messungen mit beendetem Anstieg größer als bei den Messungen mit anhaltendem Anstieg. Für die Testmessung können keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Geschwindigkeit der Erkennung festgestellt werden. Für die Validierungsmessung lagen zu den Messungen auch die Injektionszeiten vor. Dabei wird für die Messungen der Kategorie 1 festgestellt, dass bei Messungen mit längerer Injektionszeit der Anstieg der Spannweite vor dem Loslassen endete.

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, werden die Höhe und der Verlauf der gemessenen Graustufenwerte durch den Reaktionsfortschritt zum Zeitpunkt des Kunstharzaustritts beeinflusst. Die Ergebnisse der Kategorie 1 aus der Validierungsmessung lassen darauf schließen, dass ein Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Erkennung und dem Zeitpunkt des Kunst-

harzaustritts nach Injektionsstart vorliegt. Dabei besteht die Annahme, dass bei einem Kunstharzaustritt kurze Zeit nach Injektionsstart, die Reaktionsgeschwindigkeit geringer ist und sich somit die Temperatur und damit auch die Graustufenwerte langsamer erhöhen. Tendenziell wird dadurch der Grenzwert etwas später erreicht, wodurch die Kunstharzerkennung verzögert wird. Die Annahme wird dadurch bestärkt, dass bei den zwei Messungen B1 und B4, bei denen die Erkennung 5 s dauert, auch die Injektionszeit besonders kurz ist. Auch steigt in diesen beiden Messungen die Spannweite bis zum Loslassen an. Die relative Änderung der Spannweite bis zum Zeitpunkt des Loslassens ist daher bei Messungen mit anhaltendem Anstieg geringer als bei Messungen mit beendetem Anstieg. Wird das Kunstharz erst zu einem späteren Zeitpunkt der Injektion sichtbar, ist die Temperatur bereits höher. Dies führt zu einer schnelleren Erreichung des Grenzwerts für die Kunstharzerkennung. Sobald die Spannweite den Grenzwert übersteigt, hat die Reaktionsgeschwindigkeit keinen Einfluss mehr auf die Kunstharzerkennung.

Aufgrund der limitierten Datenmenge aus Kategorie 1 sollte die hier aufgestellte Annahme in zukünftigen Untersuchungen geprüft werden. Zusätzlich kann untersucht werden, ob durch eine Kopplung der Höhe des Grenzwerts an die Injektionszeit eine Reduktion der Zeit zwischen Kunstharzaustritt und Detektion realisierbar ist.

Der Ansatz zur Kunstharzerkennung wurde so konzipiert, dass bei den vorherrschenden Umgebungsbedingungen die geforderte Genauigkeit und Geschwindigkeit erreicht werden können. Sowohl bei der Test- und der Validierungsmessung im LKAB Eisenerzbergwerk Kiruna als auch bei der Testinstallation im LKAB Testbergwerk Konsuln wurde das gleiche Zweikomponenten-Kunstharzprodukt verwendet. Laut Angabe des Bergwerksbetreibers lagen die Umgebungstemperaturen während der Testmessung im Durchschnitt bei 17 °C bis 20 °C und im LKAB Testbergwerk Konsuln bei 2 °C bis 6 °C. Eine Angabe zur relativen Luftfeuchtigkeit lag nicht vor. Während der Validierungsmessung lag die gemessene Umgebungstemperatur in den zwei geankerten Strecken in einem Bereich von 15,1 °C bis 16,3 °C. In der ersten Strecke wurde eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 50 % gemessen. Dagegen wurde in der zweiten Strecke eine wesentlich höhere relative Luftfeuchtigkeit von über 90 % erfasst. Trotz der unterschiedlichen Umgebungstemperaturen ist austretendes Kunstharz in den IR-Bildern sowohl aus der Test- und der Validierungsmessung als auch aus dem LKAB Testbergwerk Konsuln deutlich erkennbar. Ein direkter Vergleich der Graustufenwerte erfolgt nicht, da unterschiedliche Kameramodelle und/oder -positionen verwendet wurden. Aufgrund eingeschränkter Sichtverhältnisse und des geringen Anteils des relevanten Bildausschnitts am Vollbild wird der Algorithmus nicht auf die IR-Bilder aus dem LKAB Testbergwerk Konsuln angewendet. Dennoch zeigen die Untersuchungen zur Positionierung auf dem Ankerbohrwagen, dass der maximale Graustufenwert nach einem Kunstharzaustritt deutlich erhöht ist (siehe Kapitel 4.1.1). Die Er-

höhung des maximalen Graustufenwerts ist auf das austretende Kunstharz zurückführen. Daraus lässt sich schließen, dass die Kunstharzerkennung mittels des thermographischen Ansatzes unter realen klimatischen Bedingungen unter Tage realisierbar ist.

Zur Ermittlung der Systemgrenzen sollten dennoch weitere Untersuchungen zur Auswirkung unterschiedlicher Umgebungstemperaturen auf die Kunstharzerkennung durchgeführt werden. Die Umgebungstemperatur hat Einfluss auf die Eigenschaften eines Kunstharzprodukts, wie z. B. die Fließ- und Aushärtezeiten. So erhöht sich mit steigender Umgebungstemperatur auch die Temperatur der Kunstharzkomponenten, was wiederum beim gleichen Kunstharzprodukt zu kürzeren Fließ- und Aushärtezeiten führt. Daher werden für unterschiedliche Umgebungstemperaturen angepasste Kunstharzprodukte eingesetzt. Auch Graustufenlage und -verlauf einer Messszene können bei verschiedenen Umgebungstemperaturen unterschiedlich sein. In diesem Zusammenhang sollte der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Geschwindigkeit der Kunstharzerkennung untersucht werden und evaluiert werden, ob eine temperatur- und/oder produktabhängige Anpassung des relativen Grenzwertes erforderlich ist.

Eine signifikante Beeinflussung der Kunstharzerkennung durch die Luftfeuchtigkeit kann anhand der Messungen aus der Validierungsmessung nicht festgestellt werden. Die grundsätzliche Eignung des IR-Kamerasystems für den Einsatz bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit konnte mit dem vorliegenden Gehäuse bei bis zu 94 % vor Ort nachgewiesen werden. Zudem konnten bei einer zusätzlichen Messung in der Klimakammer keine Auffälligkeiten im Temperaturverlauf des FPAs des Boson Kamerakerns erfasst werden. Bei gleicher Umgebungstemperatur war die Temperatur des FPAs sowohl bei hoch als auch bei niedrig eingestellter relativer Luftfeuchtigkeit fast gleich. Jedoch ist es nicht ausgeschlossen, dass eine hohe Luftfeuchtigkeit auf lange Sicht die Funktionsweise der elektronischen Bauteile beeinträchtigen kann. Insbesondere gilt es, Kondensation zu vermeiden. Kondenswasser kann bspw. auftreten, wenn die Temperatur nach dem Ausschalten der Kamera im Gehäuse abnimmt.

Die Temperatur der Kunstharzkomponenten in den Behältern auf dem Ankerbohrwagen lag während der Validierungsmessung stets um wenige Grad Celsius über der gemessenen Umgebungstemperatur. Allerdings muss einschränkend angemerkt werden, dass die Messgenauigkeit der Temperatursensoren in den Behältern nicht bekannt war. Daher ist nicht auszuschließen, dass der wahre Temperaturunterschied zwischen der Temperatur der Kunstharzkomponenten und der Umgebungstemperatur davon abweicht. Die aufgetretenen Temperaturschwankungen der Kunstharzkomponenten hatten auf die Kunstharzerkennung keinen erkennbaren Einfluss. Der größte protokollierte Temperaturanstieg betrug 2,9 °C (Start: 16,7 °C, Ende: 19,6 °C) für Komponente A und 3,7 °C (Start: 16,4 °C, Ende: 20,1 °C) für Komponente B. Empfehlenswert wäre die Prüfung, ob es Bedingungen gibt, unter denen größere Temperaturanstiege der Kunstharzkomponenten auftreten können. In diesem Zusammenhang kann untersucht werden, wie schnell die Erkennung bei unterschiedlichen Temperaturen der

Kunstharzkomponenten erfolgt. Bei negativen Auswirkungen auf die Kunstharzerkennung ist es denkbar, die Kunstharzkomponenten durch Kühlen oder Heizen auf einer konstanten Temperatur zu halten. Gegebenenfalls ist auch eine Isolierung der Behälter dafür ausreichend.

Des Weiteren kann anhand der erzielten Ergebnisse aus der Validierungsmessung gezeigt werden, dass der Ansatz zur Kunstharzerkennung auch bei lokal auftretenden Temperaturschwankungen der Gesteinsoberfläche robust ist. Die Varianz der Oberflächentemperatur des Gesteins, hatte keine feststellbaren negativen Auswirkungen auf die Kunstharzerkennung. Ebenfalls wurde mit dem in Kapitel 2.1.3 aufgeführten Versuch zur Temperaturentwicklung des Kunstharzes gezeigt, dass das ausgetretene Kunstharz innerhalb kurzer Zeit deutlich höhere Temperaturen als die Gesteinsoberfläche erreicht. Für die Testmessung lagen zur Oberflächentemperatur keine Angaben vor. Allerdings zeigten die Untersuchungsergebnisse zu den Durchschnittswerten aus Kapitel 4.3.2, dass bei den vorliegenden Umgebungsbedingungen die Graustufenwerte des Kunstharzes stets deutlich höher als die Graustufenwerte von Gestein, Ankerplatte und Injektionseinheit waren.

Anforderungskriterium: Integrierbarkeit

Der Boson Kamerakern ermöglicht durch seine geringen Abmessungen den Einsatz eines kleineren Gehäuses. Dadurch konnten die Anforderungen bezüglich der Integrierbarkeit in der Validierungsmessung noch besser erfüllt werden.

Während der Testmessung war der Reinigungsaufsatz nicht optimal eingestellt. Daher ist davon auszugehen, dass das Germaniumfenster unzureichend vor Staub- und Wassereinwirkungen geschützt wurde. Bei der visuellen Begutachtung der Daten aus der Testmessung hat sich gezeigt, dass austretendes Kunstharz unterschiedlich gut in den IR-Bildern erkennbar ist. Ein adäquates Reinigungskonzept ist erforderlich, da Verschmutzungen und Beschädigungen bspw. zu einer Reduktion des Transmissionsgrads führen können. In diesem Fall kann weniger IR-Strahlung der Messszene bis zum FPA gelangen, wodurch die Höchstwerte und die Spannweite in den IR-Bildern abnehmen. Die Bildqualität nimmt bei beeinträchtigtem Germaniumfenster ab. Ein weiterer Fokus sollte daher auf der Evaluierung und der Weiterentwicklung des Reinigungsaufsatzes des IR-Kamerasystems liegen. Für einen dauerhaften Einsatz auf dem Ankerbohrwagen ist eine Abstimmung zwischen Saugleistung und Wasserdruck notwendig. Um sicherzustellen, dass das Germaniumfenster während eines Injektionsvorgangs sauber ist, kann vorbeugend vor einer Kunstharzinjektion eine automatische Reinigung mittels des Reinigungsaufsatzes erfolgen. Gegebenenfalls ist das Reinigungskonzept anzupassen. Denkbar ist eine automatische Klappe, die ausschließlich während des Injektionsvorgangs geöffnet ist, und somit mehr Schutz bietet.

Der Einsatz einer ROI in den IR-Bildern ermöglicht es, potenzielle Störquellen auszuschließen und die zu verarbeitende Datenmenge zu minimieren. Allerdings wird die Position der ROI in

dieser Arbeit manuell ausgewählt. Eine fixe ROI ist anfälliger für Fehler durch eine Dejustage der Kamera. Daher wird für den industriellen Einsatz empfohlen, den Algorithmus um eine dynamische ROI zu erweitern, sodass die Positionierung der ROI automatisch in den IR-Bildern erfolgt.

Der Einsatz einer weiteren Kamera in Kabinennähe kann einen Mehrwert bieten, da sie eine zusätzliche Perspektive auf den Ankerbohr- und -setzprozess bietet. Dadurch ist eine Erkennung austretenden Kunstharzes, das nicht im Sichtbereich der vorderen Kamera liegt, weil es weiter nach unten fällt oder durch Maschinenteile verdeckt ist, unter Umständen trotzdem möglich. Sichteinschränkungen durch Maschinenteile traten bspw. bei den Messungen der Kategorien 2 und 3 aus der Validierungsmessung auf.

Anhand der vorliegenden Daten aus der Test- und der Validierungsmessung konnten keine negativen Auswirkungen durch kamerainterne Vorgänge auf die Kunstharzerkennung festgestellt werden. Da als maßgebliches Kriterium für die Kunstharzerkennung die Spannweite dient, können Schwankungen im Graustufenverlauf, die auf kamerainterne Vorgänge zurückzuführen sind, kompensiert werden. Aus den Untersuchungen in der Klimakammer in Kapitel 4.2 lässt sich ableiten, dass es für zukünftige Anwendungen empfehlenswert ist, die Bildaufnahme erst nach einer definierten Aufwärmzeit der Kamera zu beginnen. Auch sollte die Kamera bei Unterbrechungen und Pausen während einer Schicht nicht ausgeschaltet werden, um weitere Aufwärmphasen zu vermeiden. Zudem sind während eines andauernden Injektionsvorgangs kamerainterne Vorgänge, wie z. B. die FFC, zu unterbinden.

Anforderungskriterium: Flexibilität

Der Einsatz des thermographischen Ansatzes ist nicht auf ein bestimmtes Kamerasystem limitiert. Die in der Test- und der Validierungsmessung eingesetzten Kamerasysteme haben unterschiedliche Produktspezifikationen und unterscheiden sich z. B. in der thermischen Empfindlichkeit und im erfassten Sichtfeld. Trotzdem kann der Ansatz auf die ausgewählten Datensätze beider Messungen angewendet werden. Ebenfalls ist bei Bedarf eine situative Anpassung des Algorithmus, bspw. des relativen Grenzwertes, mit geringem Aufwand möglich. Die Anwendung des Ansatzes lässt sich somit auf andere Kunstharzprodukte, Umgebungsbedingungen, etc. übertragen und ist mit verschiedenen Kamerasystemen möglich. Wird eine IR-Kamera vornehmlich zur Überwachung des Injektionsvorgangs eingesetzt und im vorderen Bereich angebracht, ist eine Kamera mit großer Brennweite und kleinem Bildwinkel vorzuziehen. Ansonsten ist der Pixelanteil, der die Ankerplatte und dessen unmittelbare Umgebung umfasst, gering und es sind viele störende Objekte im Bild enthalten. Im Einzelfall ist stets zu prüfen, ob die Auflösung und die thermische Empfindlichkeit des ausgewählten Kameramodells ausreichend sind. Ein negativer Einfluss der Reduktion der thermischen Empfindlichkeit von $< 30 \text{ mK}$ auf $< 50 \text{ mK}$ konnte nicht festgestellt werden. In zukünftigen Untersuchungen

kann die Anforderung an die thermische Empfindlichkeit genauer untersucht werden, um Kostenreduktionspotentiale zu ermitteln.

Potenzielle Ansatzpunkte für Erweiterungen

Die Genauigkeit des Ansatzes kann gegebenenfalls verbessert werden, indem zum Arbeitsbeginn oder bei Änderung der Einsatzbedingungen eine definierte Kunstharzmenge auf die Gesteinsoberfläche abgelassen wird. Durch eine Auswertung des Verlaufs der Graustufenwerte kann geprüft werden, ob der Ansatz unverändert auf unterschiedliche Einsatzbedingungen übertragbar ist oder ob weitere Maßnahmen, wie bspw. eine Temperierung der Kunstharzkomponenten oder die Wahl anderer angepasster Kunstharzprodukte, erforderlich sind.

Zusätzlich kann der Ansatz um eine Überwachung des Aushärtvorgangs erweitert werden. Durch eine Auswertung des Spannweitenanstiegs kann ermittelt werden, wann der Aushärtvorgang ausreichend fortgeschritten ist, um die Ankerstange loszulassen. Eine variable Haltezeit ermöglicht so die Steigerung der Effizienz unter Gewährleistung einer ausreichenden Installationsqualität. Dazu kann zusätzlich zur Überwachung der Spannweitenänderung im Hinblick auf die Überschreitung eines definierten Grenzwerts, der zeitliche Aspekt mit einbezogen werden. Dabei kann betrachtet werden, wie lange die Steigung der Spannweite positiv ist. Von besonderem Interesse kann die Bestimmung individueller Haltezeiten bei der Installation von Seilankern und verlängerten SDA-Ankern mit pumpfähigem Kunstharz sein. Aufgrund der Ankerlänge ist hier eine größere Menge Kunstharz pro Ankerbohrloch erforderlich und die Injektion nimmt mehr Zeit in Anspruch. Dabei sind tendenziell größere Aushärtezeiten notwendig, damit das Kunstharz nicht zu früh während der Injektion aushärtet und dadurch das Einbringen weiteren Kunstharzes blockiert wird. Ergänzend sei an dieser Stelle auf die Überwachung der Aushärtung von Bauteilen aus Harzverbundwerkstoffen in einem Autoklav in [33] verwiesen.

Ein weiterer zukünftiger Forschungsansatz liegt in einer kombinierten Betrachtung verschiedener Informationen über den Ankerbohr- und -setzprozess. Für die Entscheidung zum Fortsetzen oder Beenden eines laufenden Injektionsvorgangs ist es denkbar neben dem Kunstharzaustritt weitere Informationen einzubeziehen. Dies kann z. B. die Menge an ausgetretenem Kunstharz, der Zeitpunkt des Kunstharzaustritts und die bis dahin injizierte Kunstharzmenge sein. Zudem kann die durchschnittliche eingebrachte Kunstharzmenge in der Umgebung hinzugezogen werden. Auch ist es möglich, die Kunstharzinjektion auf die lokalen Gebirgsbedingungen abzustimmen. Informationen über die Gesteinsqualität können bspw. über den Bohrfortschritt abgeleitet werden. Ein erhöhter Bohrfortschritt deutet darauf hin, dass Risse und/oder Hohlräume im umgebenden Gestein vorhanden sind. In diesem Fall kann es trotz eines Kunstharzaustritts aus Sicherheitsgründen sinnvoll sein, die Kunstharzinjektion bis zur Maximalmenge fortzusetzen. Auch ist ein Verschwinden von Spülwasser im Ankerbohrloch

während des Ankerbohrprozesses ein Anzeichen für schlechte Gesteinsqualität [7]. Ein Kunstharzaustritt wird dann unwahrscheinlich. Dagegen ist ein Austritt von Restspülwasser im Verlauf der Injektion in einem ansonsten nicht wasserführenden Bereich ein Anzeichen dafür, dass um das Ankerbohrloch keine oder wenige Risse und/oder Hohlräume vorliegen. Dies erhöht wiederum die Wahrscheinlichkeit das Kunstharz austritt, bevor die Maximalmenge injiziert wurde.

7 Zusammenfassung

Um die Sicherheit bei der Rohstoffgewinnung unter Tage zu gewährleisten, ist eine adäquate Gebirgssicherung unerlässlich. Der Ankerausbau ist eine bedeutende Methode, stellt jedoch eine anspruchsvolle und zeitaufwändige Tätigkeit dar. Durch den Einsatz von selbstbohrenden Injektionsankern und pumpfähigem Kunstharz als Ankermörtel wird die Effizienz gesteigert. Allerdings ist nach derzeitigem Stand der Technik nur die Wahl einer fixen Menge Kunstharz zur automatischen Injektion möglich. Wenn Kunstharz während eines Injektionsvorgangs austritt, ist ein manueller Eingriff erforderlich. An dieser Stelle besteht ein großes Automatisierungspotential, das in dieser Arbeit untersucht wurde.

Das Ziel dieser Arbeit war es, einen sensorbasierten Ansatz zur Kunstharzerkennung zu entwickeln und zu erproben. Dies ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer automatischen bedarfsgerechten Kunstharzinjektion. Das Gesamtsystem muss genau (sensitiv und spezifisch), schnell, gut integrierbar, robust und flexibel sein, um den applikationsspezifischen Anforderungen gerecht zu werden. Bisher wird ein Kunstharzaustritt durch das menschliche Auge erfasst. Naheliegend sind daher bildgebende Verfahren. Kameras, die den sichtbaren Spektralbereich erfassen, bieten eine gute örtliche Auflösung. Allerdings sind gute Lichtverhältnisse und ein ausreichender Farbunterschied bzw. Kontrast zwischen Kunstharz und Hintergrund erforderlich. Durch die exotherme Reaktion beim Aushärtvorgang erhöht sich die Temperatur des Kunstharzes auf höhere Werte als die Umgebungstemperatur. Dies bietet einen weiteren Ansatzpunkt für eine sensorbasierte Erfassung. Temperatursensoren erfassen die Temperatur jedoch nur punktuell oder gemittelt über eine Fläche. Die Infrarotthermographie kombiniert die Vorteile einer Bildgebung und einer Temperaturerfassung. Sie stellt dadurch eine hohe Informationsdichte über die Messszene bereit. Aus diesem Grund ist die Infrarotthermographie besonders geeignet für die Detektion von austretendem Kunstharz.

Zur Entwicklung und Bewertung des Ansatzes wurden die oben genannten Anforderungen genauer spezifiziert. Die Datenbasis für diese Arbeit wurde mit Messungen im untertägigen Eisenerzbergwerk Kiruna des schwedischen Bergwerksbetreibers LKAB geschaffen. Die Entwicklung des Algorithmus basiert auf dem Datensatz aus einer Testmessung. Anhand des Datensatzes aus einer Validierungsmessung wurde der entwickelte Ansatz geprüft. Bei beiden Messungen wurden derselbe Ankerbohrwagen und das gleiche pumpfähige Zweikomponenten-Kunstharzprodukt verwendet. Bei der Validierungsmessung wurde ein zweites Kamerasystem eingesetzt, um die Übertragbarkeit zu demonstrieren.

Die Wahl der Kamera und einer günstigen Position auf dem Ankerbohrwagen sind entscheidende Faktoren für eine vollständige Erfassung des relevanten Bereichs. Die gewählte Position im vorderen Bereich des Bohrarms über der Bohrlafette bietet eine direkte und weitestgehend uneingeschränkte Sicht auf den Injektionsvorgang. Zudem wurde dadurch ein annähernd konstanter Abstand von ca. 2 m zwischen der Kamera und dem Ankersetzprozess realisiert. Insbesondere galt es bei der Objektivwahl zu berücksichtigen, dass ein Kunstharzaustritt in der Position, Menge und Form des Austritts am Ankerkopf variiert. Auch geringe Mengen müssen schnell erkannt werden. Aus der gewählten Position ist mit dem in der Testmessung verwendeten Kamerasystem eine präzise Messung eines Messobjekts mit einer Größe von 11,3 mm möglich. Mit dem zweiten Kamerasystem kann ein Messobjekt von 8,2 mm Größe genau gemessen werden. Der Durchmesser der verwendeten Ankerplatten beträgt 150 mm.

Für die Ermittlung des Kunstharzaustritts wurden in dieser Arbeit der minimale und maximale Graustufenwert sowie die Spannweite herangezogen. Die Spannweite ist die Differenz aus minimalen und maximalen vorhandenen Graustufenwert in einem Bild. Um potenzielle Strahlungsquellen aus der Umgebung auszuschließen, die sich negativ auf die Erkennung auswirken können, wurden die Werte innerhalb einer kreisförmigen ROI ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass sich bei einem Kunstharzaustritt der maximale Graustufenwert signifikant erhöht und der Anstieg auf das exotherm reagierende Kunstharz zurückzuführen ist. Auf den Verlauf des minimalen Graustufenwerts hat austretendes Kunstharz keinen feststellbaren Einfluss. Jedoch konnte festgestellt werden, dass Schwankungen und/oder Sprünge im Verlauf sowohl beim maximalen Graustufenwert als auch beim minimalen Graustufenwert zeitgleich auftreten können. Diese können größtenteils mithilfe der Spannweite kompensiert werden. Aus diesem Grund bietet die Spannweite die höchste Zuverlässigkeit.

Der entwickelte Algorithmus zur Kunstharzerkennung basiert auf einer Überwachung der Spannweite. In dieser Arbeit wird für die Spannweite ein relativer Grenzwert von 20 % festgelegt. Innerhalb einer kreisförmigen ROI, die die Ankerplatte, angrenzendes Gestein und einen Teil der Injektionseinheit umfasst, wird der minimale und maximale Graustufenwert ermittelt und anschließend die Spannweite berechnet. Diese Berechnung erfolgt für jedes Bild. Aus den Spannweitenwerten der ersten 32 Bilder eines Injektionsvorgangs wird ein Durchschnittswert gebildet. Bei der Bildrate der verwendeten Kameras von 8 Bilder pro Sekunde entspricht dies einer Dauer von ca. 4 s. In dieser Zeit tritt in der Regel kein Kunstharz aus, sodass hier im Regelfall nicht mit einem starken Anstieg der Graustufenwerte zu rechnen ist. Der jeweilige ermittelte Durchschnittswert bestimmt die Größe des Grenzwertes für einen Injektionsvorgang. Um Fehldetektionen zu vermeiden, wird für die Rückmeldung eines Kunstharzaustritts ein Erreichen des relativen Grenzwerts mindestens 8 Mal in Folge vorausgesetzt.

Der Ansatz wurde anhand der Daten aus der Validierungsmessung erprobt. Dabei wurden die Messungen mit Kunstharzaustritt in drei Kategorien eingeteilt. Die Kategorie 1 umfasst Messungen mit während des Injektionsvorgangs in den IR-Bildern sichtbaren Kunstharzaustritt. Messungen, in denen der Kunstharzaustritt erst nach dem Loslassen der Ankerstange in den IR-Bildern sichtbar ist, sind der Kategorie 2 zugeordnet. Wenn Leckagen oder Störungen bzw. Defekte auftraten, sind die Messungen in Kategorie 3 einsortiert.

Bei der Anwendung des Algorithmus auf die Daten aus der Validierungsmessung wurde der Kunstharzaustritt bei allen Messungen der Kategorie 1 sicher erkannt. Jedoch ergeben sich aufgrund der Anordnung der Maschinenteile Sichteinschränkungen, abhängig von der Position im zu ankernden Streckenbereich. Aus diesem Grund wurden konstruktive Anpassungsoptionen in dieser Arbeit vorgeschlagen. Da die Sicherheitsanforderungen unter Tage hoch sind, wurde in dieser Arbeit der Spezifität eine höhere Gewichtung als der Sensitivität beigemessen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass eine hohe Spezifität durch den Ansatz erreicht wird. Bei den betrachteten Messungen ohne Kunstharzaustritt wurde in keinem Fall irrtümlicherweise Kunstharz erkannt. Auch eine Verwechslung mit einem Wasseraustritt kann ausgeschlossen werden. Darüber hinaus zeigte sich anhand der Daten aus der Testmessung, dass eine Erkennung auch bei visuell als schlecht eingestuftem Bildqualität möglich ist.

Die angestrebte Zeitdauer von 2 s für die Kunstharzerkennung wird für 5 von 7 Messungen der Testmessung erzielt. Bei der Validierungsmessung wird für 3 von 6 Messungen der Kategorie 1 das Zeitziel erreicht. Mögliche Gründe für die langsamere Erkennung können identifiziert und Maßnahmen abgeleitet werden. Mögliche zukünftige Untersuchungen können den Zusammenhang der Geschwindigkeit der Erkennung mit dem Zeitpunkt des Kunstharzaustritts und dem Reaktionsstadium umfassen. Dabei kann die Möglichkeit der Ableitung eines variablen Grenzwerts in Abhängigkeit von der Injektionszeit evaluiert werden.

Die Machbarkeit der Integration des IR-Kamerasystems in die bestehende Maschinentechnik wurde nachgewiesen. Ein Austausch des Kamerasystems in der Validierungsmessung, hat die flexible Anwendbarkeit des Ansatzes gezeigt. Der Einsatz eines eigens konzipierten Kameraschutzgehäuses mit Reinigungsaufsatz bietet Schutz vor den anspruchsvollen Umgebungsbedingungen und erhöht die Robustheit. Für zukünftige Anwendungen ist der Reinigungsaufsatz auf die Erfordernisse am Einsatzort abzustimmen, um eine hohe Sauberkeit des Öffnungsfensters zu gewährleisten.

Mithilfe der Laboruntersuchungen in der Klimakammer konnten folgende Maßnahmen für den Kamerabetrieb abgeleitet werden: Vor dem Start der Bildaufnahme ist das Ende der Aufwärmzeit der Kamera abzuwarten. Ebenfalls sind erneute Aufwärmphasen durch häufiges Ausschalten der Kamera zu vermeiden sowie interne Korrekturvorgänge während der Dauer einer Injektion zu unterbinden. Auch konnte anhand der Laborergebnisse gezeigt werden, dass ein

sicherer Kamerabetrieb über mehrere Stunden sowie bei den betrachteten Umgebungstemperaturen von 15 °C bis 35 °C gewährleistet ist.

Zusammenfassend demonstriert die vorliegende Arbeit, dass anhand des entwickelten thermographischen Ansatzes eine Erkennung von austretendem Kunstharz während des Injektionsvorgangs möglich ist. Damit ist bestätigt, dass die gewählte Sensortechnologie in Kombination mit dem entwickelten Algorithmus ein valider Ansatz ist, um den Prozess um eine bedarfsgerechte Kunstharzinjektion zu erweitern und somit den Automatisierungsgrad in der Ankerinstallation zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

- [1] MORRISON, D. Driving Mining Underground. *Engineering and Mining Journal*, 2006, 207(5), S. 60-62. ISSN 0095-8948
- [2] WAGNER, H. Gebirgsmechanische Herausforderungen des tiefen Bergbaus [online]. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 2017, 162(10), S. 475-479. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00501-017-0637-0
- [3] FRITZSCHE, C.H. *Lehrbuch der Bergbaukunde mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus*. Bd.2 - 10. Auflage, Reprint [d. Ausg.] Berlin [u.a.], 1962. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1982. ISBN 3-540-02821-8
- [4] KARLBERG, M. *Auto Bolt Reload – für mehr Sicherheit im Bergbau und Automatisierung im Bergbau*. Unveröffentlichter Abstract. MiningForum, Berlin, 2019
- [5] GIRMSCHIED, G. *Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2013. ISBN 978-3-433-60313-0
- [6] LI, C.C. *Rockbolting: Principles and Applications*. Oxford, Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0-12-804401-8
- [7] BRAY, P. und JOHNSON, A. The search to find a better solution for mechanised bolting in difficult rock conditions. Bergteknikdagen, 2019 [Zugriff am: 11. März 2022]. Verfügbar unter: https://www.svbergteknik.se/UserFiles/Archive/2909/BT_4_Jakten%20p%C3%A5%20b%C3%A4ttre%20mekaniserad%20bultning.pdf
- [8] REUTHER, E.-U. *Lehrbuch der Bergbaukunde mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus*. 11., vollständig neu bearbeitete Auflage. Essen: Verlag Glückauf, 1989. Erster Band. ISBN 3-7739-0493-2
- [9] EPIROC AB. *Epiroc launches pumpable resin system for underground rock bolting* [online], 2019 [Zugriff am: 4. Juni 2023]. Verfügbar unter: <https://www.epiroc.com/en-uk/newsroom/2019/epiroc-launches-pumpable-resin-system-for-underground-rock-bolting>
- [10] EPIROC AB. *Boltec Auto Bolt Reload: Rock bolting rig with fully mechanized reloading functionality* [online]. Datenblatt, 2022 [Zugriff am: 29. Oktober 2023]. Verfügbar unter: https://www.epiroc.com/content/dam/epiroc/underground-mining-and-tunneling/tme/drilling-technical-specifications/boltec/9869_0191_01a_Boltec_Auto_Bolt_Reload_technical%20specification_english.pdf
- [11] EPIROC AB. *Rock bolting rigs* [online] [Zugriff am: 27. März 2023]. Verfügbar unter: <https://www.epiroc.com/en-ie/products/rock-reinforcement/rock-bolting-rigs>

- [12] ATLAS COPCO AB. *Boltec MC Operator Training* [online]. PowerPoint, 2016 [Zugriff am: 11. November 2022]. Verfügbar unter: <https://www.slideshare.net/CarrollSparksSr/01-atlas-copco-boltec-power-point>
- [13] Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 21521-1:1990-07, *Gebirgsanker für den Bergbau und den Tunnelbau: Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag, 1990
- [14] VERBAND DER KALI- UND SALZINDUSTRIE E.V. *Grundsätze der systematischen Ankerung zur Firstsicherung im Kali-und Steinsalzbergbau (Ankerleitlinie)*. 2. Auflage. Berlin, 2016
- [15] HADJIGEORGIOU, J. und CHARETTE, F. Rock Bolting for Underground Excavations. In: HUISTRULID, W.A. und BULLOCK, R.L., Hrsg. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2001, S. 547-554. ISBN 0-87335-193-2
- [16] WEBER MINING & TUNNELLING SAS. Broschüre vom Messebesuch bauma 2022: Brochure WMT-01-EN
- [17] MINOVA INTERNATIONAL LIMITED. *The Minova Guide to Resin-Grouted Rockbolts*, 2006
- [18] WEBER MINING & TUNNELLING SAS. *ROCLOC® Resin Cartridges* [online] [Zugriff am: 16. März 2023]. Verfügbar unter: <https://weber-mining.com/rocloc-resin-cartridges>
- [19] MINOVA INTERNATIONAL LIMITED. Resin system and rock anchor. Erfinder: SYKES, A. und HAWKER, R. Anmeldung: 26. Juli 2011. US2015117962 (A1)
- [20] STEIN, D. *Instandhaltung von Kanalisationen*. 3. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 1998. ISBN 3-433-01315-2
- [21] WEBAC-CHEMIE GMBH. *Silikat Injektionsharze: WEBAC® SILcompact M* [online]. Technisches Merkblatt. 2020 [Zugriff am: 29. Oktober 2023]. Verfügbar unter: https://www.webac.de/downloads/Technische_Merkblaetter/de/TM__WEBAC-SILcompact_M__DE.pdf
- [22] KOMERCI OHG. *Infrarot-Thermometer HP-1800C* [online]. Bedienungsanleitung [Zugriff am: 29. Oktober 2023]. Verfügbar unter: <https://asset.conrad.com/media10/ad/160267/19d4690e133380f076daee5ebc9306f73/c3/-/a8857dac32d4d4c47a4395164510b1009?direct>
- [23] OSINGA, D. *A review of the High-Performance rock-bolting method and its application in a Nordic mine*. Masterarbeit, Aalto University. Espoo und Helsinki, 2018
- [24] SANDVIK AB. *Rock support drill rigs* [online] [Zugriff am: 28. März 2023]. Verfügbar unter: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/underground-drill-rigs-and-bolters/rock-support-drill-rigs/>

- [25] EPIROC AB. *Boltec M10 Battery freecut, front left view* [online]. Media Gallery [Zugriff am: 4. Juni 2023]. Verfügbar unter: https://www.media.epiroc.com/en/search-results/file-detail.html/content/dam/epiroc/underground-mining-and-tunneling/tme/boltec/boltec-m10-and-e10/Boltec%20M10%20Battery_tech_08.tif.html
- [26] SANDVIK AB. *Außenhammer-Einsteckende* [online] [Zugriff am: 29. März 2022]. Verfügbar unter: <https://www.rocktechnology.sandvik/de/produkte/bohrwerkzeuge/außenhammer-bohrwerkzeuge/außenhammer-einsteckende/>
- [27] EPIROC AB. *Epiroc Boltec M Battery makes its debut in Canada* [online], 2021 [Zugriff am: 5. Juni 2023]. Verfügbar unter: <https://www.epiroc.com/en-uk/newsroom/2021/epiroc-boltec-m-battery-makes-its-debut-in-canada>
- [28] GUSTAFSON, A., SCHUNNESSON, H., TIMUSK, M. und HAUTA, R. Productivity of rock reinforcement: methodology development [online]. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2016, 116(12), S. 1127-1134. Verfügbar unter: doi:10.17159/2411-9717/2016/v116n12a6
- [29] MINOVA INTERNATIONAL LIMITED. *CarboThix Rapid: Two component silicate resin* [online]. Technisches Datenblatt. 2020 [Zugriff am: 29. Oktober 2023]. Verfügbar unter: <https://www.minovaglobal.com/emea-cis/products/injection-chemicals/carbothix/carbothix-rapid/>
- [30] EPIROC AB. *New bolting resin accelerates development work at Voisey's Bay* [online], 2021 [Zugriff am: 7. Juni 2023]. Verfügbar unter: <https://www.epiroc.com/en-uk/customer-stories/2021/new-bolting-resin-accelerates-development-work-at-voiseys-bay>
- [31] INTERNATIONAL INTEC CO. ESTABLISHMENT. In ein vorgebohrtes Loch einzusetzender Injektionsanker. Erfinder: ALFONS, H. Anmeldung: 20. Februar 1989. DE3905095 (A1)
- [32] FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. Epoxidharzsystem mit visueller Kontrolle des Aushärtezustandes. Erfinder: LÜHRING, A. Anmeldung: 11. März 2011. DE102011013645 (A1)
- [33] AIRBUS OPERATIONS S.L. Method and system for curing resin composite parts with surface temperature control. Erfinder: SANTOS GOMEZ, J. M. und RAMOS MORENO, R. Anmeldung: 25. Juli 2012. EP2689909 (A1)
- [34] HIMXENTECH INC.; KIM, J.M. Smart optical investigation automatic hardening system and method for repairing underground pipe using this same. Erfinder: KIM, J. M. Anmeldung: 27. März 2020. KR102186483 (B1)
- [35] WOLFF, C. Grundlegendes zum Bremsvorgang. In: BREUER, B. und BILL, K.H., Hrsg. *Bremsenhandbuch: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012, S. 13-23. ISBN 978-3-8348-2225-3

- [36] KÜRBIG, J. und SAUTER, M. *Bildsegmentierung: Übersicht; Seminar: Bildsegmentierung und Computer Vision WS 2005/6* [online], 2005 [Zugriff am: 29. Oktober 2023]. Verfügbar unter: https://www.mathematik.uni-ulm.de/stochastik/lehre/ws05_06/seminar/ausarbeitung_sauter.pdf
- [37] BERNHARD, F., Hrsg. *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-642-24506-0
- [38] PARTHIER, R. *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-13598-0
- [39] NAU, M. *Elektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern*. Fulda: JUMO GmbH & Co. KG, 2004. ISBN 978-3-935742-06-1
- [40] PHOENIX CONTACT GMBH & CO. KG. *Analoge Signalübertragung in der MSR-Technik: Anwenderhandbuch*. Revision 02. Blomberg, 2018
- [41] HERING, E. und SCHÖNFELDER, G., Hrsg. *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete*. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ISBN 978-3-658-12562-2
- [42] WALLRABE, A., TACKE, M. und EBERT, R. *Infrarot-Kameras: Grundlagen, Technologien und Systeme*. Ursprünglich erschienen unter dem Titel: Nachtsichttechnik. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022. ISBN 978-3-658-38542-2
- [43] VOLLMER, M. und MÖLLMANN, K.-P. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Second Edition. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2018. ISBN 978-3-527-69332-0
- [44] SCHMIDT, U. *Professionelle Videotechnik: Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studiotechnik in SD, HD, UHD, HDR, IP*. 7., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2021. ISBN 978-3-662-63944-3
- [45] TEUBNER, U. und BRÜCKNER, H.J. *Optical Imaging and Photography: Introduction to Science and Technology of Optics, Sensors and Systems*. Berlin, Boston: De Gruyter, 2019. ISBN 978-3-11-047294-3
- [46] NISCHWITZ, A., FISCHER, M., HABERÄCKER, P. und SOCHER, G. *Computergrafik und Bildverarbeitung: Band II: Bildverarbeitung*. 3., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. ISBN 978-3-8348-1712-9
- [47] MTS MESSTECHNIK SCHAFFHAUSEN GMBH. *Günther GmbH Temperaturmesstechnik | Technische Informationen zu Widerstandsthermometern* [online] [Zugriff am: 2. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://www.mts.ch/produkte-messtechnik-schaffhausen-gmbh/guenther-gmbh-temperaturmesstechnik-thermoelemente-widerstandsthermometer/technische-informationen/technische-informationen-zu-widerstandsthermometern/1-aufbau-und-funktionsweise-von-widerstandsthermometern.html/280>

- [48] WIKA ALEXANDER WIEGAND SE & CO. KG. *Einsatzgrenzen und Genauigkeiten von Platin-Widerstandsthermometern nach DIN EN IEC 60751* [online]. Datenblatt, 2020 [Zugriff am: 29. Oktober 2023]. Verfügbar unter: https://www.wika.fi/upload/DS_IN0017_de_de_20803.pdf
- [49] ES ELECTRONIC SENSOR GMBH. *Technische Daten für Widerstandsthermometer nach DIN EN 60751* [online] [Zugriff am: 12. Mai 2023]. Verfügbar unter: <https://www.electronic-sensor.de/technische-informationen/widerstandsthermometer-pt100>
- [50] MTS MESSTECHNIK SCHAFFHAUSEN GMBH. *Günther GmbH Temperaturmesstechnik | Technische Informationen zu Thermoelementen* [online] [Zugriff am: 1. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://www.mts.ch/produkte-messtechnik-schaffhausen-gmbh/guenther-gmbh-temperaturmesstechnik-thermoelemente-widerstandsthermometer/technische-informationen/technische-informationen-zu-thermoelementen/1-aufbau-und-funktionsweise-von-thermoelementen.html/296>
- [51] GLÜCKERT, U. *Erfassung und Messung von Wärmestrahlung: Eine praktische Einführung in die Pyrometrie und Thermographie*. München: Franzis-Verlag, 1992. ISBN 3-7723-6292-3
- [52] BUDZIER, H. und GERLACH, G. *Thermische Infrarotsensoren: Grundlagen für Anwender*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2010. ISBN 978-3-527-40960-0
- [53] SCHUSTER, N. und KOLOBRODOW, V.G. *Infrarotthermographie*. 2. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2004. ISBN 3-527-40509-7
- [54] LINDE, C. und DITTRICH, B. *Wärmebildkamera*. Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg: Ecomed Sicherheit, 2013. Fachwissen Feuerwehr. ISBN 978-3-609-68448-2
- [55] EDMUND OPTICS, INC. Katalog für Optik & Photonik, 2022
- [56] OPTRIS GMBH. *Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung*. Broschüre: Grundlagen-BR-DE2019-06-A, 2019
- [57] TELEDYNE FLIR LLC. *What is a Non-Uniformity Correction (NUC)?* [online], 2020 [Zugriff am: 18. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.flir.com/discover/professional-tools/what-is-a-non-uniformity-correction-nuc/>
- [58] BERG, J. *Entwicklung und prototypischer Einsatz eines Infrarotkamarasystems für Automatisierungslösungen im Rohstoffsektor*. Dissertation, RWTH Aachen University. Aachen, 2016
- [59] FLIR SYSTEMS, INC. *FLIR Boson™ Thermal Imaging Core, Release 320*. Datenblatt, 2018
- [60] WORKSWELL. *GigE module for FLIR TAU2 compatible with all TAU2 units, Revision Number 210126*. Datenblatt, 2021

- [61] FLIR SYSTEMS, INC. *BOSON VPC ACCESSORY WITH USB-ANALOG CABLE*. Technische Zeichnung, 2018
- [62] FLIR SYSTEMS, INC. *IDD, BOSON 640 CAMERA CORE - 9Hz, 8.7mm-f1.0*. Technische Zeichnung, 2017
- [63] FLIR SYSTEMS, INC. *FLIR Tau2 Product Specification, Nr. 102-PS242-40, Version 141*. Datenblatt, 2015
- [64] FLIR SYSTEMS, INC. *Tau 2: Longwave Infrared Thermal Imaging Cameras*. Datenblatt, 2014
- [65] FLIR SYSTEMS, INC. *IDD, TAU CAMERA, 9mm-f1.4, 17um 640x512*. Technische Zeichnung, 2011
- [66] FLIR SYSTEMS, INC. *Punktgrößenverhältnis: Wie weit können Sie messen? Wieso das Punktgrößenverhältnis entscheidend ist* [online], 2018 [Zugriff am: 29. Oktober 2023]. Verfügbar unter: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/17-1465/17-1465_DE.pdf
- [67] EPUTEC DRUCKLUFTTECHNIK GMBH. *Venturidüsen Übersicht - Air Amplifier - Luftstromverstärker* [online] [Zugriff am: 6. April 2022]. Verfügbar unter: <https://www.eputec.de/exair-venturiduesen/venturiduesen-luftstromverstaerker/>
- [68] ANGELANTONI TEST TECHNOLOGIES SRL. *Compact climatic and thermostatic chambers* [online], 2020 [Zugriff am: 21. September 2022]. Verfügbar unter: https://back.acstestchambers.com/storage/app/media/prodotti/ANG-SCHUDE%20TECNICHE_Compact_rev1.pdf
- [69] GHM MESSTECHNIK GMBH. *Betriebsanleitung GFTB 200* [online] [Zugriff am: 29. Oktober 2023]. Verfügbar unter: https://www.greisinger.de/files/upload/de/produkte/bda/GFTB200_DE.pdf
- [70] VOLT CRAFT. *Bedienungsanleitung: LCD-Handthermometer DT-300 Version 05/10* [online], 2010 [Zugriff am: 29. Oktober 2023]. Verfügbar unter: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/gl/000100827ML02/bedienungsanleitung-100827-voltcraft-dt-300-temperatur-messgeraet-50-300-c-fuehler-typ-ntc.pdf>

Anhang

Anlage 1: Übersicht der Messungen mit Kunstharzaustritt, Testmessung

Tag	Messung	Zeitdauer	Minimalwertdifferenz	Maximalwertdifferenz	Min./Max. Spannweite	Relative Änderung der Spannweite
1	VT1	38	27	77	47/103	119,15 %
1	VT2	34	71	226	67/341	408,96 %
1	VT3	31	18	814	236/1052	345,76 %
1	VT4	32	20	442	96/553	476,04 %
1	VT5	31	30	365	85/467	449,41 %
1	VT6	28	10	69	83/152	83,13 %
2	VT15	29	10	54	64/117	82,81 %

Anlage 2: Übersicht der Messungen ohne Kunstharzaustritt, Testmessung

Tag	Messung	Zeitdauer	Minimalwertdifferenz	Maximalwertdifferenz	Min./Max. Spannweite	Relative Änderung der Spannweite
1	VT7	40	12	21	86/105*	-18,10 %
2	VT8	52	24	32	41/59*	-30,51 %
2	VT11	53	22	25	72/92	27,78 %
2	VT12	54	14	11	45/59	31,11 %
2	VT13	52	18	33	66/104*	-36,54 %
2	VT14	55	10	14	59/75*	-21,33 %

* Die größte Spannweite liegt im Zeitverlauf vor der kleinsten Spannweite

Schriftenreihe des Institute for Advanced Mining Technologies

ABAR Aachener Beiträge zur Angewandten Rechnertechnik

- Band 1 Weidemann J. (1992).
Rechnerunterstützte Maschinenüberwachung als Instrument der vorausschauenden Instandhaltung in Walzwerken am Beispiel von Profilwalzgerüsten;
ISBN: 3-86073-051-7
- Band 2 Cerv, H. (1992).
Softwarekonzept zur Analyse und echtzeitfähigen Simulation des dynamischen Verhaltens elektromechanisch gekoppelter Antriebe;
ISBN: 3-86073-058-4
- Band 3 Ruhnau, S. (1992).
Automatisierung des Darstellungsprozesses bei der Variantenkonstruktion von Gewindebohrwerkzeugen unter Verwendung einer graphischen Programmiersprache am Beispiel eines mittelständischen Zulieferunternehmens der Montanindustrie;
ISBN: 3-86073-067-3
- Band 4 Schniering, B. (1993).
Entwicklung und Umsetzung einer praxisorientierten CIM-Strategie als Informationssystem für kleine Unternehmen der Präzisionswerkzeugindustrie am Beispiel eines indirekten Zulieferunternehmens der Montanindustrie;
ISBN: 3-86073-153-X
- Band 5 Streichfuss, M. (1993).
Maschinendiagnose an dieselgetriebenen Transportfahrzeugen im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-154-8
- Band 6 Friedhelm, K. (1993).
Konzeption eines Informationssystems für bergmännische und markscheiderische Planung und Dokumentation;
ISBN: 3-86073-166-3
- Band 7 Borstell, D. (1993).
Entwicklung eines Softwarekonzeptes für die rechnergestützte maschinentechnische Detailplanung im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-163-7
- Band 8 Linnartz, A. (1993).
Integration von Zustandsdiagnose u. Instandhaltungsplanung, -steuerung und -analyse für dieselgetriebene Transportfahrzeuge im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-290-0
- Band 9 Müller, T. (1994).
Zustandsüberwachung und Verfügbarkeitsprognose in Großanlagen der Stahlindustrie;
ISBN: 3-86073-291-9

-
- Band 10 Kessler, H.-W. (1994).
Entwicklung und Untersuchung eines Diagnosesystems zur Wälzlagerüberwachung hydrodynamischer Getriebe;
ISBN: 3-86073-292-7
- Band 11 Peschers, H. (1994).
Funktionalität und Aufbau eines Leitsystems zur Verbesserung der Materiallogistik von Steinkohlenbergwerken;
ISBN: 3-86073-293-5
- Band 12 Dumoulin, L. (1995).
Die berührungslose, digitale Messung von Drehmoment und Drehzahl;
ISBN: 3-86073-294-3
- Band 13 Broderius, T. (1995).
Konzeption eines objektbasierten Programmsystems zur markscheiderischen Bearbeitung und Abbauplanung plattenförmiger Lagerstätten;
ISBN: 3-86073-295-1
- Band 14 Geropp, B. (1995).
Schwingungsdiagnose an Wälzlagern mit Hilfe der Hüllkurvenanalyse;
ISBN: 3-86073-296-X
- Band 15 Plaster, A. (1996).
Weiterentwicklung des wettertechnischen CAE-Arbeitsplatzes für den deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-297-8
- Band 16 Ahrens, M. (1996).
Entwicklung eines Konzeptes zur Auslegung und zeitoptimalen Berechnung metallischer Zylinderkopfdichtungen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode;
ISBN: 3-86073-298-6
- Band 17 Zhang, M. (1996).
Messstellenreduktion an elektromechanischen Antriebssträngen mittels prozessgeführter digitaler Simulation - ein Beitrag zur Maschinenüberwachung und vorausschauenden Instandhaltung;
ISBN: 3-86073-299-4
- Band 18 Mackel, J. (1996).
Die anwendungsorientierte Elastizitätsberechnung von Walzgerüsten unterschiedlicher Bauart;
ISBN: 3-86073-530-6
- Band 19 Seeliger, A. (1996).
AKIDA - Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 30.-31. Mai 1996 in Aachen;
ISBN: 3-86073-531-4
- Band 20 Staniullo, H.-J. (1996).
Ein Beitrag zur Entwicklung eines graphikorientierten Informationssystems für die maschinentechnische Betriebsmitteleinsatzplanung im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-532-2

-
- Band 21 Tao, X. (1997).
Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Ermittlung des Brennraumdruckverlaufs aus der Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle;
ISBN: 3-86073-533-0
- Band 22 Petit, E. (1997).
Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Nassaufbereitung von Bauschutt;
ISBN: 3-86073-534-9
- Band 23 Levin, C. (1997).
Konzeption und Realisierung eines rechnergestützten Planungs- und Informationssystems für die Projektplanung im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-535-7
- Band 24 Kaub, R. (1997).
Konzeption und Realisierung eines Informationssystems zur Dokumentation und Vorhersage der Ausgasung im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-536-5
- Band 25 Schumacher, T. (1998).
Konzeption und Entwicklung eines integrierten maschinentechnischen Planungs- und Informationssystems für Rohstoffgewinnungsbetriebe;
ISBN: 3-86073-537-3
- Band 26 Rensmann, F. (1998).
Entwicklung einer kleinbauenden Gruben-Diesellokomotive mit optimiertem hydraulischen Antriebssystem unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-538-1
- Band 27 Asch, A. (1998).
Technische Diagnose am stoßaufgeladenen Dieselmotor mit Hilfe leistungskorrelierter Meßgrößen;
ISBN: 3-86073-539-X
- Band 28 Koch, S. (1998).
Schwingungssimulation industrieller Antriebe mit Drehfeldmaschinen großer Leistung;
ISBN: 3-86073-700-7
- Band 29 Wischnewski, R. (1998).
Entwicklung eines modularen, wissensbasierten Systems zur Diagnose von dieselgetriebenen Transportfahrzeugen im Deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-701-5
- Band 30 Seeliger, A. (1998).
AKIDA - 2. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 3.-4. Juni 1998 in Aachen;
ISBN: 3-86073-531-4
- Band 31 Burgwinkel, P. (1998).
Das Transportleitsystem TLS - ein zentrales Planungs-, Steuerungs- und Überwachungssystem zur Verbesserung der Materiallogistik von Steinkohlenbergwerken;
ISBN: 3-86073-703-1

-
- Band 32 Lange, C. (1998).
Die Entwicklung eines Planungs- und Informationssystems für die bergmännische Planung im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-704-X
- Band 33 Melder, W. (1999).
Konzeption einer Regelung zur automatischen Kohleninjektion in Drehstromlichtbogenöfen;
ISBN 3-86073-705-8
- Band 34 Georges, D. (1999).
Konzeption, Entwicklung und Einsatz eines Überwachungssystems zur Erkennung und Vermeidung von qualitätsmindernden Störschwingungen an Kaltwalzgerüsten;
ISBN: 3-86073-706-6
- Band 35 Lorbach, J. (1999).
Konzeption und Implementierung eines objekt-orientierten Datenmodells zur integrierten Nutzung von Prozessdaten für den Bereich Wettertechnik;
ISBN: 3-86073-707-4
- Band 36 Reimers, J. (1999).
Konzeption eines Rohrleitungsplanungssystems für den deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-708-2
- Band 37 Arefzadeh, S. (1999).
Klassifizierung der Belastung von Walzanlagen mittels Softcomputing-Methoden als Grundlage zur Stichplan- und Restlebensdaueroptimierung;
ISBN: 3-86073-709-0
- Band 38 Bauer, B. (2000).
Körperschallanalyse von Verzahnungen im Rahmen der zustandsorientierten Instandhaltung;
ISBN: 3-86073-670-1
- Band 39 Baumann, S. (2000).
Entwicklung eines Diagnosesystems für hydrostatische Antriebe von dieselgetriebenen Transportfahrzeugen im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-671-X
- Band 40 Mandelartz, J. (2000).
Der Sekundäraluminium-Stoffstrom in Deutschland unter transporttechnischen und logistischen Gesichtspunkten;
ISBN: 3-86073-672-8
- Band 41 Schneider, S. (2000).
Methode zur Zustandsüberwachung von Kreuzgelenkwellen in den Hauptantrieben von Walzgerüsten;
ISBN: 3-86073-673-6
- Band 42 Quacken, G. (2000).
Bestimmung von produktspezifischen, störungsbedingten Qualitätskosten bei der Maschinendiagnose;
ISBN: 3-86073-674-4
- Band 43 Türk, M. (2001).
Optimierung des Walzprozesses und der Anlagenauslastung durch moderne Diagnoseverfahren und vernetzte Überwachungssysteme;
ISBN: 3-86073-675-2

-
- Band 44 Teschers, R. (2001).
Konzeption und Entwicklung eines Gesamtinformationssystems in einem interdisziplinären Forschungsprogramm am Beispiel eines Arbeitsbereichs;
ISBN: 3-86073-676-0
- Band 45 Shan, J. (2001).
Zustandsdiagnose von Planetengetrieben bei stationärem und instationärem Betrieb mit Hilfe der Schwingungsanalyse;
ISBN: 3-86073-677-9
- Band 46 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2002).
AKIDA - 4. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 6.-7. November 2002 in Aachen;
ISBN: 3-86073-677-9
- Band 47 Becker, F. (2002).
Entwicklung und Erprobung eines neuartigen integrierten Informations-, Kommunikations- und Automatisierungssystems für den Untertagebau;
ISBN: 3-86073-679-5
- Band 48 Nahrath, T. (2003).
Untersuchung zur Erfassung des Säulendurchmessers bei der Düsenstrahlinjektion zur Baugrundfestigung;
ISBN: 3-89653-981-7
- Band 49 Heim, G. K. (2003).
Grenzen und Möglichkeiten einer EDV-Unterstützung gruppenbezogener Planungsarbeit am Beispiel bergbaulicher Produktionsbetriebe;
ISBN: 3-86130-210-1
- Band 50 Vollmer, A. (2003).
Technische und organisatorische Lösungen zur Einführung von Instandhaltungsplanungs- und -steuerungssystemen;
ISBN: 3-86130-192-X
- Band 51 Markhöfer, J. (2003).
Konzeption und Realisierung eines modellgestützten Instrumentariums zur Optimierung der Transportlogistik für den primären und sekundären Kupferstoffstrom;
ISBN: 3-86130-196-2
- Band 52 Hoppe, H. (2003).
Konzeption und Entwicklung eines technischen Berichtssystems zur weltweiten Anlagenüberwachung am Beispiel von Gutbett-Walzenmühlen;
ISBN: 3-86130-211-X
- Band 53 Weyres, S. (2003).
Mobile Computing in der Instandhaltung - Realisierung medienbruchfreier Arbeitsabläufe;
ISBN: 3-86130-212-8
- Band 54 Schaaf, C. (2003).
Entwicklung eines Reportgenerators zur prozessoptimierten Messsignalauswertung an Walzanlagen;
ISBN: 3-86130-213-6

-
- Band 55 Reitz, K. (2004).
Betrachtung der Körperschallemission von Wälzlagern zur Verfeinerung der Zustandsdiagnose;
ISBN: 3-86130-214-4
- Band 56 Gantevoort, T. (2004).
Integration der Körperschalldiagnose in das kommunikations- und informationstechnische System des deutschen Untertagebergbaus;
ISBN: 3-86130-215-2
- Band 57 Janser, S. (2004).
Modellierung einer Redistributionslogistik metallhaltiger Gebrauchsgüter am Beispiel von Elektronikaltgeräten;
ISBN: 3-86130-216-0
- Band 58 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2004).
AKIDA - 5. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 9.-10. November 2004;
ISBN: 3-86130-217-9
- Band 59 Schumacher, G. (2004).
Entwicklung und Erprobung eines nassmechanischen Bauschuttsortierers;
ISBN: 3-86130-218-7
- Band 60 Küpper, T. M. E. (2005).
Konzeption und Entwicklung eines intranetbasierten Informationssystems für den deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86130-219-5
- Band 61 Aguilar, C. A. (2005).
Konzeption und Implementierung einer komponentenbasierten Softwareentwicklungsplattform für raumbezogene internetfähige Informationssysteme;
ISBN: 3-86130-220-9

ASRE Aachener Schriften zur Rohstoff- und Entsorgungstechnik

- Band 62 Balke, A. (2006).
Lebenszyklusrechnung von IPS-Systemen in der Auswahl-, Einführungs- und Betriebsphase;
ISBN-10: 3-9810344-2-2; ISBN-13: 978-3-9810344-2-4
- Band 63 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2006).
AKIDA - 6. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 14.-15. November 2006 in Aachen;
ISBN-10: 3-9810344-3-0; ISBN-13: 978-3-9810344-3-1
- Band 64 Charlier, F. (2006).
Neuentwicklung eines schlagwettergeschützten Dieselmotors der Leistungsklasse bis 100 kW mit Abgasturbolader;
ISBN-10: 3-9810344-4-9; ISBN-13: 978-3-9810344-4-8
- Band 65 Bencze, A. (2007).
Entwicklung eines miniaturisierten Drehmomentmesssystems - μ -ETC;
ISBN: 978-3-9810344-5-5

-
- Band 66 Brümmer, G. (2008).
Konzeption, Entwicklung und Einführung eines grafikbasierten Qualitätssicherungs-Systems für den mobilen Einsatz;
ISBN: 978-3-9810344-7-9
- Band 67 Steinhusen, C. (2008).
Konzept zur Überwachung elektronischer Komponenten in Windenergieanlagen mit Hilfe konditionierter Simulation und begleitender Messung;
ISBN: 978-3-9810344-9-3
- Band 68 Meßner, A. (2008).
Verfahren zur Schadensdetektion bei langsam oszillierenden Kreuzgelenkwellenlagerungen in Walzwerksantrieben;
ISBN: 978-3-941277-00-7
- Band 69 Lachmann, J. M. (2008).
Entwicklung eines simulationsgestützten Condition-Monitoring-Systems zur Onlineüberwachung des mechanischen Antriebsstranges von Multimegawattwindenergieanlagen;
ISBN: 978-3-941277-01-4
- Band 70 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2008).
AKIDA - 7. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 18.-19. November 2008 in Aachen;
ISBN: 978-3-941277-02-1
- Band 71 Buttgerit D. A. (2009).
Konzeption und Entwicklung eines WLAN-basierten Kommunikations- und Informationssystems für den deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 978-3-941277-04-5
- Band 72 Molina Vicuña, C. (2010).
Contributions to the analysis of vibrations and acoustic emissions for the condition monitoring of epicyclic gearboxes;
ISBN: 978-3-941277-06-9
- Band 73 Nienhaus, K., Burgwinkel, P. (2010).
AKIDA - 8. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 17.-18. November 2010 in Aachen;
ISBN: 978-3-941277-08-3
- Band 74 Neye, E. (2010).
Integration von Informationstechnologie und Grubengebäude bei der Betriebsmittelplanung von Steinkohlebergwerken;
ISBN: 978-3-941277-09-0
- Band 75 Vreydal, D. (2011).
Entwicklung und Einsatz numerischer Simulationsmodelle zur Restlebensdauerabschätzung bei Antriebssträngen von Hubwindensystemen unter Nutzung eines zweiparametrischen Kollektivverfahrens;
ISBN: 978-3-941277-10-6
- Band 76 Mavroudis, F. (2011).
Infrarotsensorik zur Grenzschichterkennung - Entwicklung und Einsatz eines bildgebenden Infrarotsystems bei der Automatisierung von Walzenladern im Untertagebergbau;
ISBN: 978-3-941277-12-0

-
- Band 77 Becker, S. (2011).
Weiterentwicklung und Erprobung eines Kollisionsschutzsystems für Personen und Fahrzeuge im Untertagebergbau;
ISBN: 978-3-941277-13-7
- Band 78 Gaastra, M. (2012).
Online-Elementanalyse in der Rohstoffgewinnung - Entwicklung und Konzeptionierung von Anwendungen der laserinduzierten Plasmaspektroskopie zur Echtzeitbestimmung mineralischer Rohstoffe am Beispiel unter- und überflächiger Gewinnungsgeräte;
ISBN: 978-3-941277-14-4
- Band 79 Vintila, C. R. (2012).
Entwicklung und Erprobung eines internetfähigen komponentenbasierten Informationssystems zur Echtzeitüberwachung von Schienenfahrzeugen;
ISBN: 978-3-941277-15-1
- Band 80 Vijayakumar, N. (2012).
Computer based prototype of heavy duty drive systems by electromechanical co-simulation;
ISBN: 978-3-941277-16-8
- Band 81 Nienhaus, K., Burgwinkel, P. (2012).
AKIDA - 9. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 14.-15. November 2012 in Aachen;
ISBN: 978-3-941277-17-5
- Band 82 Baltes, R. (2013).
Entwicklung und Erprobung eines dieselelektrischen Hybridantriebes;
ISBN: 978-3-941277-18-2
- Band 83 Hahn, M. H. (2013).
Abbildendes Radarsystem für die Rohstoffindustrie;
ISBN: 978-3-941277-19-9
- Band 84 Nienhaus, K., Burgwinkel, P. (2014).
AKIDA - 10. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 19.-20. November 2014 in Aachen;
ISBN: 978-3-941277-21-2
- Band 85 Zingsheim, J. M. (2015).
Inertiale Navigation für die Rohstoffindustrie;
ISBN: 978-3-941277-23-6
- Band 86 Bitzen, S. (2015).
Konzeption und Entwicklung eines 3D-Modell-basierten Prozessüberwachungssystems für die Rohstoffgewinnung;
ISBN: 978-3-941277-24-3
- Band 87 Boos, F. D. (2015).
Acoustic Emission bei der Maschinen- und Prozessüberwachung - Neue Analysemethoden und Anwendungsgebiete;
ISBN: 978-3-941277-25-0
- Band 88 Gárate Peñaranda, K. A. (2016).
Pattern Recognition, Classification and Diagnosis of Acoustic Emission Signals in Applications for Mining;
ISBN: 978-3-941277-26-7

-
- Band 89 Schütz, M. (2016).
Konzeptentwurf und Erprobung eines Messsystems zur verbesserten Bestimmung der Ab-
legereife von Rundstahlgliederketten;
ISBN: 978-3-941277-28-1
- Band 90 Berg, J. (2016).
Entwicklung und prototypischer Einsatz eines Infrarotkamarasystems für Automatisierungs-
lösungen im Rohstoffsektor;
ISBN: 978-3-941277-29-8
- Band 91 Neumann, K. W. (2016).
Ultra-Wideband-Technologie für den Einsatz im Schwermaschinenbau;
ISBN: 978-3-941277-30-4
- Band 92 Röllinger, D. M. (2017).
Beitrag zur Zustandsüberwachung von oszillierenden Wälzlagern am Beispiel von Wind-
energie Pitchlagern;
ISBN: 978-3-941277-31-1
- Band 93 Büschgens, C. (2017).
Einfluss von Schnittparametern auf Schneidkraft und Acoustic Emission am Schneidkan-
tenmeißel;
ISBN: 978-3-941277-33-5
- Band 94 Fietz, N. B. (2018).
Konzept für die explosionsgeschützte Materialanalyse von Staub-Wasser-Gemischen;
ISBN: 978-3-941277-34-2
- Band 95 Klein, C. I. (2018).
Ein Beitrag zur schwingungsbasierten Zustandsüberwachung mit kostengünstigen Systeme-
n;
ISBN: 978-3-941277-35-9
- Band 96 Vraetz, T. (2018).
Entwicklung und Anwendung eines innovativen Konzepts zur Inline-Charakterisierung von
Stoffgemischen in kontinuierlichen Massenströmen mittels der Acoustic Emission Techno-
logie;
ISBN: 978-3-941277-36-6
- Band 97 Hilbert, M. (2018).
Investigation of the Gear Mesh vibrations of Planetary Gearboxes Considering phase mod-
ulation and Internal measurements;
ISBN: 978-3-941277-37-3
- Band 98 Philipp, M. (2018).
Ein Beitrag zur sensorunterstützten Steuerung schneidender Gesteinslöseverfahren;
ISBN: 978-3-941277-38-0
- Band 99 Bernet, C. (2018).
Ein Beitrag zur Analyse von Schallemissionssignalen;
ISBN: 978-3-941277-39-7
- Band 100 Niestroj, C. A. W. (2019).
Performance und Potential eines untertägigen Lokalisierungssystems auf Basis der Ultra-
wideband Funktechnologie;
ISBN: 978-3-941277-41-0

-
- Band 101 Leaman Weiffenbach, F. A. (2019).
Contributions to the diagnosis and prognosis of ring gear faults of planetary gearboxes using acoustic emissions;
ISBN: 978-3-941277-42-7
- Band 102 Philipp, B. (2020).
Entwicklung und Validierung eines Konzepts zur Gesteinscharakterisierung mittels Infrarotthermographie;
ISBN: 978-3-941277-43-4
- Band 103 Niedringhaus, K. C. (2020).
Entwicklung eines Condition-Monitoring-Systems auf Basis einer Belastungsanalyse am Beispiel eines Beraubers;
ISBN: 978-3-941277-45-8
- Band 104 Hartmann, T. (2021).
Ein Beitrag zur untertägigen Navigation von mobilen Maschinen;
ISBN: 978-3-941277-46-5
- Band 105 Kianfar, A. E. (2022).
Ultra-wideband based positioning systems for harsh mining environment;
ISBN: 978-3-941277-47-2
- Band 106 Uth, F. (2022).
Entwicklung und Bewertung des Einsatzpotentials eines untertägigen Lokalisierungssystems für Personen basierend auf Ultra-Breitband Funktechnologie;
ISBN: 978-3-941277-48-9
- Band 107 Wiele, S. (2023).
Entwicklung eines Stereo-Thermographie Systems als Beitrag zum maschinellen Sehen in der Rohstoffindustrie;
ISBN: 978-3-941277-49-6
- Band 108 Radl, A. (2023).
Entwicklung eines Konzeptes zur sensorbasierten Löserdetektion während des schlagenden Beraubens;
ISBN: 978-3-941277-51-9

Der Ankerausbau ist eine bedeutende Methode zur Gebirgssicherung im untertägigen Bergbau. Wenngleich bevorzugt vollmechanisierte Ankerbohrwagen eingesetzt werden, stellt die Ankerinstallation eine anspruchsvolle und zeitaufwendige Tätigkeit dar. Das Streben nach einer vollumfänglichen Automatisierung und Effizienzsteigerung des Ankerbohr- und -setzprozesses führt zu einer stetigen Weiterentwicklung der Installationsmethoden. Herausfordernd ist dabei die Vielzahl der Teilarbeitsschritte. Insbesondere bei der Injektion von pumpfähigem Kunstharz als Ankermörtel besteht Automatisierungsbedarf.

Derzeit finden bei der automatischen Injektion einer zuvor festgelegten Menge an Kunstharz lokal variierende Gebirgsbedingungen keine Berücksichtigung. Aus diesem Grund ist bislang ein manueller Eingriff erforderlich, wenn überschüssiges Kunstharz aus dem Bohrloch austritt. Für eine bedarfsgerechte Gestaltung des Prozesses ist eine sensorbasierte Erkennung eines Kunstharzaustritts während des Injektionsvorgangs notwendig. Die vorliegende Dissertationsschrift setzt hier an und beschreibt die Entwicklung und Erprobung eines thermographischen Ansatzes zur Kunstharzerkennung bei der Installation von Gebirgsankern.

Die Basis des entwickelten Automatisierungsansatzes bildeten Messungen im untertägigen LKAB Eisenerzbergwerk Kiruna.