

# Multidirektionale Reflexionsanalyse zur Bestimmung des Umhüllungsgrades von bitumentumhüllten Gesteinskörpern

Christian Mulsow und Lars Marschke

Der Beitrag beschäftigt sich mit der Bestimmung von Flächenanteilen von Bitumen auf teilweise bedeckten Gesteinsoberflächen. Die Aufgabenstellung stammt aus dem Bereich der Materialprüfung im Straßenbau. Zum Testen der affinen Eigenschaften der Asphaltbestandteile Bitumen und Gestein werden diese mechanisch unter Vorhandensein von Wasser definiert beansprucht. Der Grad des Ablösens des Bitumens von der Gesteinsoberfläche dient als Indikator für die Güte der Affinität. Bisher wurde der Umhüllungsgrad der Proben durch Prüfer per Augenmaß quantifiziert. Im Rahmen diverser Forschungsprojekte wurde versucht, die fehleranfällige subjektive Abschätzung durch automatische Verfahren zu ersetzen. Diese basieren auf der Analyse der unterschiedlichen Farbwerte von Gestein und Bitumen in RGB-Kameraaufnahmen. Dabei werden besondere Anforderungen an die Umgebungsbedingungen bei der Fotoaufnahme und an den Laboranten gestellt. Zudem bestehen aufgrund des notwendigen Farbunterschiedes zwischen Bitumen und Gestein noch Schwierigkeiten bei der Analyse bestimmter Gesteinsarten. Bei der neu entwickelten multidirektionalen Reflexionsanalyse werden statt der Farbwerte, die unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten von Bitumen und Gestein als trennendes Kriterium herangezogen. Durch gerichtete Beleuchtung mit einem Laser können diese Unterschiede sichtbar gemacht werden. Die diffuse Reflexion an der Gesteinsoberfläche und die gerichtete Reflexion am optisch glatteren Bitumen sorgen im Kamerabild für eindeutig trennbare Helligkeitswerte. Die Farbe des Materials spielt damit keine Rolle. Der Ansatz wurde in einem Verfahren umgesetzt und evaluiert. Im Beitrag werden die Methode selbst, Ansätze zur Elimination von Reflexionen und erste Ergebnisse vorgestellt. Zudem werden das Messprinzip den bestehenden Verfahren gegenübergestellt und Vor- und Nachteile angeführt.

The paper describes the determination of the percentage area of bitumen on partly covered aggregate. This task is a typical issue in material testing in road construction. The asphalt components bitumen and aggregate are subjected to defined mechanical stress in the presence of water in order to test the affine properties of the components. The degree to which the bitumen separates from the aggregate surface serves as an indicator for the quality of the affinity. Until now, examiners have been judging the coverage degree of samples by visual rating. Several research projects attempted to replace the error-prone subjective assessment by automatic procedures. These procedures analyse the different chromaticities of aggregate and bitumen in RGB images. However, these approaches as a whole are not reliable enough because of the rather specific requirements that are made on the environmental conditions when the picture is taken and also on the lab assistant. Moreover, the analysis is not suitable for all types of rock because of the necessary difference in colour between bitumen and aggregate. Contrary to previous approaches, the new multi-directional reflectance measurements use the different surface characteristics of bitumen and aggregate instead of the chromaticities as separation criteria. These differences are made visible by directional lighting with a laser. The diffuse reflection from the aggregate surface and the directional reflection from the optically smoother bitumen produce definitely distinguishable brightnesses in the image. Thus the colour of the material is of no significance. The approach was used in a procedure and assessed. The paper presents the method itself, approaches for the elimination of reflections and first results. Moreover, the measuring principle is compared with existing procedures and benefits and drawbacks are outlined.

Verfasserschriften:  
Dipl.-Ing. C. Mulsow,  
Technische Universität  
Dresden, Professur für  
Photogrammetrie,  
Institut für Photogramm-  
metrie und Fernerkundung,  
Helmholtzstraße 10,  
01062 Dresden,  
christian.mulsow@  
tu-dresden.de;  
Dipl.-Ing. L. Marschke,  
Technische Universität  
Dresden,  
Institut für Stadtbauwesen  
und Straßenbau,  
Helmholtzstraße 10,  
01062 Dresden,  
lars.marschke@tu-  
dresden.de

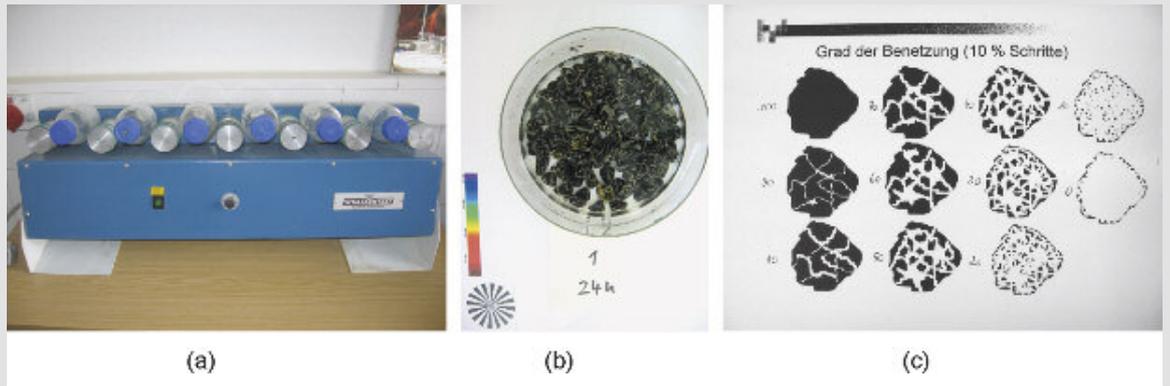
## 1 Einleitung

Bund, Länder und Kommunen investieren jährlich mehrere Milliarden Euro in den Bau und den Erhalt des Straßennetzes. Mit der Zunahme der Verkehrsbelastungen (Zunahme an Achsübergängen, höhere

Achslasten) sowie klimatischer Veränderungen steigen stetig die Anforderungen an den Straßenaufbau. Die Straßenbefestigungen sollen diese Belastungen innerhalb eines vorgegebenen Nutzungszeitraumes möglichst schadlos aufnehmen. Der größte Teil des Straßennetzes besteht

aus Asphaltstraßen. Das Ermüdungs- und Verformungsverhalten dieser Verkehrswege wird dabei maßgeblich durch die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Asphaltes bestimmt. Die Zusammensetzung des Mischgutes Asphalt ist hierbei von wesentlicher Bedeutung. As-

Bild 1: Rolling-Bottle-Versuchsanlage, Gesteinsprobe, Anhaltswerte für die subjektive Beurteilung



phalt besteht aus Gesteinskörnungen, Bitumen, Luftporen und diversen Zusätzen. Das Bitumen dient dabei als Bindemittel zwischen den einzelnen Gesteinskörnern. Die auftretenden Biegezugspannungen im Asphalt erfordern eine ausreichend hohe bindende Wirkung des verwendeten Bitumens auf das Gemisch. Nicht jedes Gestein und Bitumen, welche im Straßenbau und speziell im Asphaltmischgut zum Einsatz kommen, haben die gleichen affinen Eigenschaften zueinander. Daher müssen die zur Anwendung kommenden Bestandteile hinsichtlich ihres Haftverhaltens geprüft werden. Die DIN EN 12697-11 benennt den Rolling-Bottle-Versuch als Verfahren zur Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen. Innerhalb des Prüfverfahrens wird eine definierte Menge Gesteinskörnung mit einer bestimmten Kornfraktion durch Mischen mit Bitumen umhüllt. Das Gemisch wird dann gedrittelt und in Prüfflaschen mit destilliertem oder

entionisiertem Wasser gefüllt. Anschließend werden die Flaschen auf einem Flaschen-Rollgerät um ihre eigene Achse gedreht (Bild 1 a). Die mechanische Beanspruchung führt zum sukzessiven Ablösen des Bitumens vom Gestein. Die Rolldauer beträgt üblicherweise 6 und 18 Stunden. In bestimmten Zeitabständen werden die Proben den Flaschen entnommen und in Wasser gefüllte Glasschalen auf einer weißen Unterlage platziert (Bild 1 b). Zwei Prüfer schätzen anschließend unabhängig voneinander den Bitumen-Umhüllungsgrad des Gesteins. Die Ergebnisse des Rolling-Bottle-Tests dienen dann als Entscheidungsgrundlage, ob das Gesteinskorn-Bitumen-Gemisch den definierten Anforderungen genügt. Ist dies nicht der Fall, muss eine Zugabe von Haftvermittlern zur Erhöhung der Affinität erfolgen. Dies geht jedoch mit einer Erhöhung der Herstellungskosten des Asphalts einher. Der wirtschaftliche Schaden unge-

nügend bestimmter Affinität ist sowohl für die Asphalt Hersteller als auch für die Baulastträger relevant. Eine im Rolling-Bottle-Test zu optimistisch abgeschätzte Affinität kann frühzeitige Schäden in der eingebauten Asphaltdeckschicht zur Folge haben. Eine zu pessimistische Einschätzung bedingt den Einsatz von Haftvermittlern und führt zu steigenden Kosten. Die bestehenden Normen empfehlen mit dem Rolling-Bottle-Versuch ein Prüfverfahren, welches auf subjektiven Einschätzungen basiert. Die Subjektivität soll zwar der Norm nach durch schematische Vergleichsabbildungen (Bild 1 c) reduziert werden, eine relativ große Restunsicherheit verbleibt dennoch. Zudem wird in der Vorschrift ausreichende Schulung des Personals und letztendlich Erfahrung vorausgesetzt. Testreihen haben zudem gezeigt, dass die Zuverlässigkeit, Vergleichbarkeit und Genauigkeit der Ergebnisse limitiert ist.

Bild 2: Klassifikation von RGB-Bildern mit probabilistischem Segmentierungsansatz. Links: Datengrundlage. (a) Aufnahme des Hintergrunds mit Kristallisationsschale. (b) Aufnahme von Rohlingen. (c) Aufnahme vollständig bitumenbedeckter Gesteinskörner. (d) Aufnahme von Gesteinskörnern nach Beanspruchung im Rolling-Bottle-Versuch. Mitte und Rechts: Messbild vs. Ergebnisbild (aus Morgenstern et al., 2010)

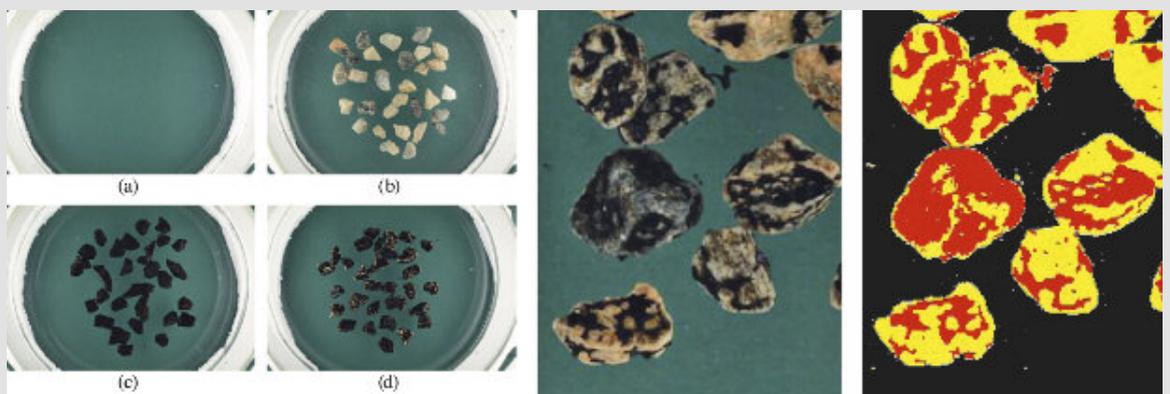
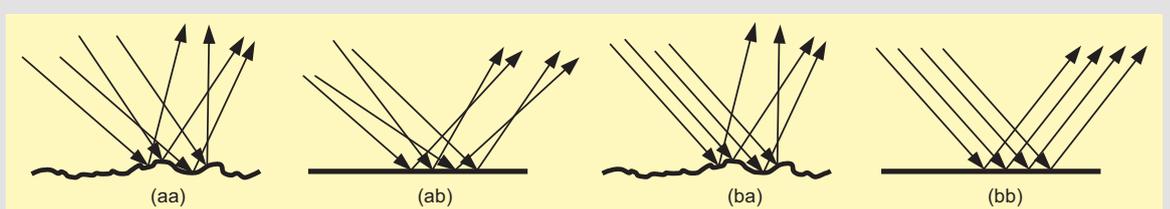


Bild 3: Diffuse (aa) vs. gerichtete Reflexion (ab) bei diffuser Beleuchtung; Diffuse (ba) vs. gerichtete Reflexion (bb) bei gerichteter Beleuchtung



## 2 Problemstellung

Im Rahmen diverser Forschungsprojekte (Grönnige, 2008; Morgenstern et al., 2010) wurde versucht, die fehleranfällige subjektive Abschätzung durch automatische Verfahren zu ersetzen. Primäres Ziel war die Steigerung der Genauigkeit, der Zuverlässigkeit sowie der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Weiterhin wurde die Verringerung des manuellen Aufwandes für die Versuchsauswertung sowie die Reduktion der Anforderungen an das Personal angestrebt.

Die oben angeführten Forschungsprojekte befassten sich mit der computergestützten Auswertung von Farbbildern der bitumenumhüllten Proben. Prinzipiell basieren die beiden entwickelten Verfahren auf einer überwachten multispektralen Klassifikation. Grönnige beschreibt die Verwendung des für die Klassifikation von Luft- und Satellitenbildern entwickelten kommerziellen Programms ENVI (ITT Visual Information Solutions). Dabei wurden in den Messbildern manuell Trainingsgebiete für die Klassen Hintergrund, Gestein und Bitumen definiert. Die anschließend durchgeführte Klassifikation ergab schließlich ein Ergebnisbild mit drei Klassen. Aus dem Verhältnis der Pixelanzahl der Klassen konnte schließlich der prozentuale Umhüllungsgrad berechnet werden.

Morgenstern verwendet eine Kombination aus Segmentierung und Klassifikation, wobei die Trainingsgebiete durch separate Referenz-Bildaufnahmen von Hintergrund sowie vollständig mit Bitumen überdeckten bzw. unbedeckten Gestein definiert werden (Bild 2, links). Das implementierte Verfahren basiert auf einem probabilistischen Segmentierungsansatz (Schlesinger/Flach, 2008). Der Grundgedanke besteht darin, zunächst den Zusammenhang zwischen Bildinhalt und dem gesuchten Bedeckungsgrad der Gesteinskörner durch Angabe eines Modells für deren Verbundwahrscheinlichkeit statistisch zu modellieren. Die im Modell enthaltenen Parameter werden durch einen Lernprozess auf der Basis der oben erwähnten Referenzbilder geschätzt (Bild 2, rechts).

Beide Verfahren haben Vorteile hinsichtlich des Automatisierungsgrades, jedoch limitieren die Nachteile deren Anwendung:

- dunkle Gesteinsproben verhindern eine sichere Unterscheidung vom umhüllenden Bitumen,

- Reflexionen an der Bitumenoberfläche durch Spiegelungen führen zu Fehlklassifikationen,
- Schattenwürfe durch seitliche Beleuchtung der Probe können zur fehlerhaften Klassifizierung dieser Flächen führen (z. B. Hintergrund wird als Stein klassifiziert),
- helle Gesteinsoberflächen in Verbindung mit zu schwacher Beleuchtung bewirken eine Beeinträchtigung der Kornflächenermittlung,
- Probleme bei unterschiedlich stark angeleuchteten Gesteinskörnern bei dunklen und sehr ungleichmäßig ausgebreiteten Proben,
- Abhängigkeit der Klassifizierungsergebnisse von der Definition der Trainingsklassen (entweder über manuell festgelegte Trainingsgebiete oder über separate Referenzaufnahmen vom Hintergrund sowie unbedeckten bzw. vollständig von Bitumen umhüllten Steinen),
- hoher Rechenaufwand aufgrund der Komplexität des verwendeten Auswertalgorithmus (vor allem beim probabilistischen Segmentierungsansatz, ca. 1 h).

Daher sollen im Rahmen eines zukünftigen Forschungsvorhabens weitere Verfahren zur präziseren Bestimmung des Umhüllungsgrades entwickelt werden. Die Voruntersuchungen ergaben, dass die multidirektionale Reflexionsanalyse mittels Laser eine leistungsfähige Methode zur Lösung der Messaufgabe darstellt.

## 3 Messprinzip

Das im Folgenden vorgestellte Verfahren der Multidirektionale Reflexionsanalyse nutzt die unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften von gebrochenem Gestein

und Bitumen. Gebrochenes Gestein hat eine im optischen Sinne signifikant rauere Beschaffenheit als Bitumen, d. h. die Oberflächenvariation relativ zur Wellenlänge ist um einige Dimensionen größer. Dies bewirkt eine diffuse Reflexion an der Gesteinsoberfläche und eine gerichtete Reflexion am optisch glatteren Bitumen (Bild 3 (aa), (ab)).

Dieser Unterschied kann verstärkt werden, wenn gerichtet beleuchtet und eine Beleuchtungsquelle mit geringem Wellenlängenbereich (Reflexion wellenlängenabhängig) verwendet wird (Bild 3 (ba), (bb), (ab)). Prädestiniert dafür sind Laser, da diese im Gegensatz zu klassischen Lichtquellen (z. B. Glühlampe) in einem schmalen Frequenzspektrum parallele Strahlung erzeugen können.

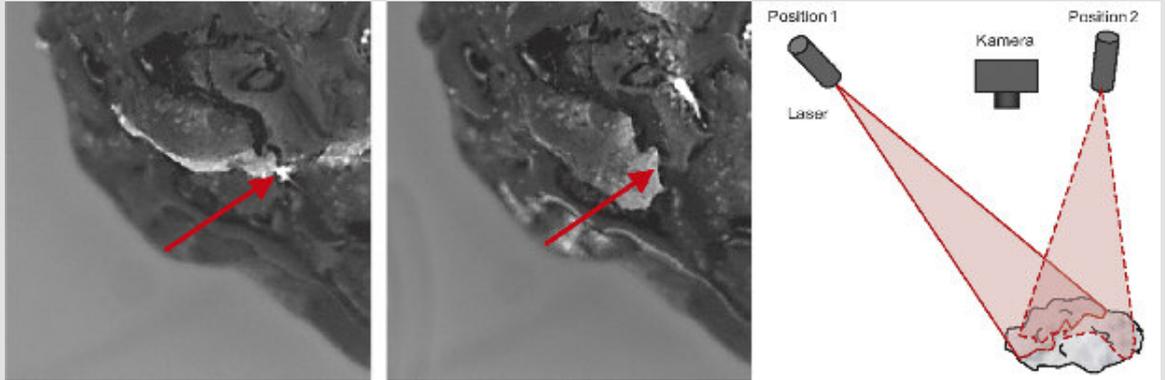
Das Bild 4 verdeutlicht die Effekte anhand von Aufnahmen von bitumenumhüllten Gesteinen unter Tageslicht und zusätzlicher Beleuchtung mit einer Laserdiode der Wellenlänge 660nm. Im sichtbaren Spektrum des Lichtes liegen die Helligkeiten der Bitumen- und Gesteinsoberfläche im Bild 4 links dicht beieinander. Eine automatische Klassifizierung ist hier quasi nicht möglich. Im Bild 4 rechts ermöglicht die diffuse Reflexion (hell) des Laserlichts an der Gesteinsoberfläche eine signifikante Unterscheidung vom optisch glatten Bitumen (dunkel). Auffällig in beiden Bildern sind überstrahlte Pixel an einigen Bitumenkanten, hervorgerufen durch Totalreflexion direkt auf den Sensor. Diese stören die Klassifizierung aufgrund ihrer Helligkeit, da diese Bildbereiche fälschlicherweise als Gestein interpretiert werden könnten.

Das Auftreten von Reflexionen ist neben der Ausrichtung der Flächennormale im entsprechenden Oberflächenpunkt vom Auftreffwinkel des Laserlichtes abhängig.



Bild 4: Aufnahmen von bitumenumhüllten Schottersteinen unter Tageslicht (links) und zusätzlicher Laserdiodenbeleuchtung (rechts)

Bild 5: Detektion von Reflexionen aus dem Vergleich zweier Aufnahmen mit Beleuchtung durch einen Linienlaser aus unterschiedlichen Richtungen (längs und quer zur Bildbreite)



Beleuchtet man jedoch das Objekt aus unterschiedlichen Richtungen und vergleicht die entsprechenden Aufnahmen miteinander, können diese problematischen Reflexe detektiert werden (Bild 5). Der markierte Bereich verdeutlicht das zugrunde liegende Analyseprinzip. Das Gestein erscheint bei Beleuchtung in beiden Aufnahmen hell, das Bitumen in der ersten Aufnahme hell und in der zweiten dunkel.

#### 4 Praktische Umsetzung

Für erste Untersuchungen kam zunächst eine monochrome Machine-Vision Kamera mit einer Auflösung von 1280x960 Pixel und einer Aufnahme­frequenz von 15 fps zum Einsatz. Als Beleuchtungsquelle wurde statt einer Laserdiode ein Linienlaser verwendet. Tests hatten gezeigt, dass die Güte der Beleuchtung hierbei höher lag

und damit die Trennung von Bitumen und Gestein eindeutiger gelang. Die flächige Beleuchtung durch eine Laserdiode ließ die Wertebereiche der Helligkeiten der einzelnen Klassen näher zusammenrücken. Als eine Ursache konnte die zusätzliche Beleuchtung des Bitumens durch diffus am Untergrund sowie am Gestein reflektierte Laserlichtbestandteile identifiziert werden. Bei Verwendung eines Linienlasers kann die Erfassung der Probe natürlich nicht aus einer einzelnen Aufnahme erfolgen. Daher wird eine Sequenz aus mehreren Bildern durch die Kamera akquiriert und diese dann zu einem Bild fusioniert. Der Laser wird bei der Aufnahme um die Querachse geschwenkt und damit die Probe quasi abgescannt. Da die Scharfabbildung der Laserlinie nicht von Relevanz ist, kann das Lasermodul handgeführt werden.

Die Breite der Laserlinie bestimmt die notwendige Anzahl der Aufnahmen zur vollständigen Beleuchtung der Messobjekte. Eine Reduzierung der Linienbreite erhöht die Güte der Beleuchtung, führt jedoch zu einer erhöhten Anzahl von notwendigen Bildern. Hier muss ein Kompromiss gefunden werden. Als praktikabel haben sich Breiten von ca. 1 cm erwiesen. Zur Eliminierung von störenden Reflexionen wird zudem mindestens eine zweite Sequenz aufgenommen, wobei das Untersuchungsobjekt quer zur Anfangsrichtung durch den Laser beleuchtet wird (siehe auch Abschnitt 3). Die Kamerastandorte sind identisch, um eine einfache Fusion der Datensätze zu ermöglichen (siehe auch Bild 5).

Nach der Datenaufnahme liegen dann mindestens zwei Bildsequenzen mit jeweils unterschiedlicher gerichteter Beleuchtung vor. Die Bildauswertung gestaltet sich in der Weise, dass die jeweilige Sequenz via Maxstore in ein Ergebnis-Bild überführt wird. Dabei werden die Einzelbilder mit

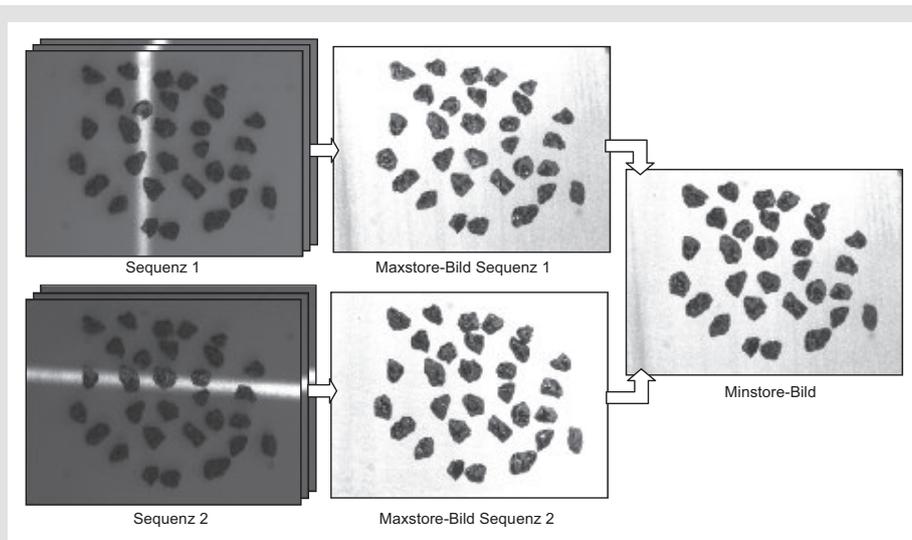


Bild 6: Auswertung der Bildsequenzen via Maxstore- und Minstore-Algorithmus (Sequenzen bestehend aus ca. 1000 Einzelbildern)

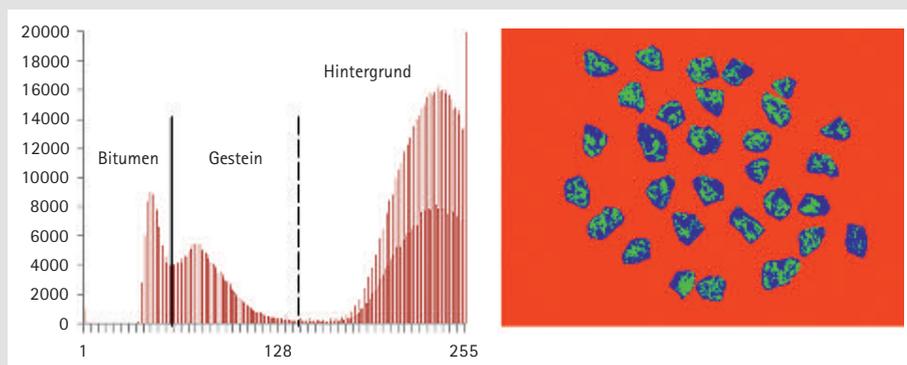


Bild 7: Histogramm der Grauwerte im Minstore-Bild, Ergebnisbild mit den drei Klassen Bitumen, Gestein und Hintergrund

einander verglichen und für jede Pixelposition der maximal vorkommende Grauwert im Ergebnisbild abgelegt. Die Eliminierung der Überstrahlungen (Reflexe) erfolgt durch die rechnerische Kombination der Maxstore-Bilder über einen Minstore-Ansatz. Dabei werden in beiden Bildern für jede Pixelposition die jeweiligen Grauwerte verglichen und der niedrigere Wert dann in das Ergebnisbild übernommen. Dieses ist nun befreit von etwaigen Störungen und zeigt das Bitumen als dunkle Flächen, welche sich klar vom Gestein abheben (Bild 6). Aus der Analyse des Histogramms kann der Schwellwert zwischen Bitumen und Gestein automatisch ermittelt und ein Binäres Bild gerechnet werden. Dieses zeigt dann ausschließlich die Bitumenflächen. Diese Fläche kann dann in einem weiteren Schritt von der Gesamtfläche der Steine abgezogen werden. Zuvor muss jedoch der Hintergrund eindeutig von den Proben getrennt werden. Dieses könnte theoretisch ebenfalls aus der Analyse des Minstore-Bildes erfolgen, jedoch ist das Bild durch Schatten aufgrund der nichtsenkrechten Beleuchtung durch den Laser verfälscht. Die Separierung erfolgt daher aus der Analyse einer einzelnen Aufnahme mit diffuser Tageslichtbeleuchtung. Dabei wird ein Kantenbild erzeugt und die umschlossenen Segmente extrahiert. Diese stellen dann die Steinflächen dar. In einem letzten Schritt wird das Extraktionsbild mit dem Minstore-Bild kombiniert. Als Ergebnis liegt nun ein in drei Klassen unterteiltes Bild vor (Bild 7).

## 5 Fazit und Ausblick

Das vorgestellte Verfahren wurde in einer ersten Phase im Rahmen von Reihentests unterschiedlicher Gesteins-Bitumen Mischungen zusammen mit dem probabilistischen Segmentierungsansatz und dem subjektiven Schätzverfahren evaluiert. Da ein Verfahren zur Bestimmung des Umhüllungsgrades mit übergeordneter Genauigkeit und Zuverlässigkeit nicht vorlag, konnte die Beurteilung der Ergebnisse nur über Einschätzungen und manuelle Klassifikationen erfolgen. Dabei traten folgende Vorzüge der multidirektionalen Reflexionsanalyse zu Tage:

- einfaches Beleuchtungsmanagement,
- weniger fremdlichtanfällig,
- schnelle Datenverarbeitung durch wenig rechenintensive Algorithmen (Echtzeitfähigkeit),

- geringe Fehleranfälligkeit,
- unabhängig von Gesteinsfarbe.

Im Rahmen weiterer Studien sollen zudem zusätzliche Optimierungsansätze untersucht werden:

- Erhöhung der Zuverlässigkeit der Resultate der Bildverarbeitung durch Optimierung der gerichteten Beleuchtung (Einfallswinkel, Laserlinienbreite),
- Optimierung der Datenakquisition (mindestens notwendige Anzahl von Bildern),
- Auswertung des Minstore-Bildes mit kantenbasierten Verfahren anstatt über Schwellwerte zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit.

Die Kosten des Messaufbaus (Kamera, Lasermodul, PC) sind gemessen an der Ersparnis an Zeit und Personal als gering einzustufen. Bevor jedoch eine uneingeschränkte Empfehlung für den Einsatz des Verfahrens in Baustofflaboren gegeben werden kann, ist eine absolute Validierung notwendig. Die Schaffung von Referenzproben mit bekannter Überdeckung ist dabei von zentraler Bedeutung.

### Literaturverzeichnis

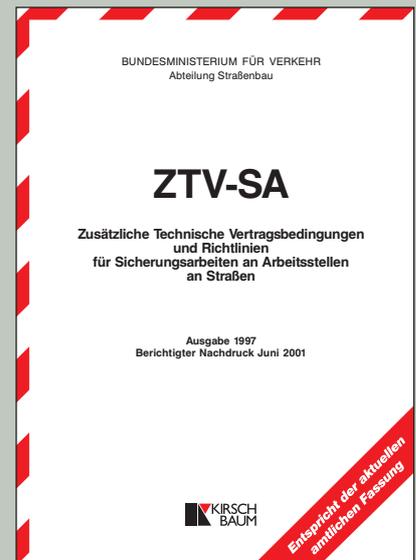
Deutsches Institut für Normung e.V., (2005): DIN EN 12697-11, Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 11: Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen

Grönnige, J. (2008): Computergestützte Auswertung von Rolling-Bottle-Tests, Straße und Autobahn 7/2008, S. 415–419

Morgenstern et al. (2010): Endbericht Projekt – Verbesserung der Präzision der Prüfung zur Bestimmung des Haftverhaltens zwischen groben Gesteinskörnungen und Bitumen, Forschungsvorhaben an der TU Dresden finanziert durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), FE 6.088

Schlesinger, D.; Flach, B. (2008): A Probabilistic Segmentation Scheme, Pattern Recognition, LNCS 5096, 2008, S. 183–192

## Fachbuch-Information



# ZTV-SA 97

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Sicherungsarbeiten an Arbeitsstellen an Straßen. Ausgabe 1997, aktualisierter Nachdruck Juni 2001  
40 Seiten DIN A 4, kartoniert,  
€ 9,-/CHF 16,-.  
ISBN 3 7812 1545 8.

Die ZTV-SA 97 sind vom Bundesminister für Verkehr gleichzeitig mit neun einschlägigen Technischen Lieferbedingungen eingeführt worden.

Die ZTV-SA werden bei allen Baumaßnahmen im Bundesfernstraßenbereich als Bestandteil der Vertragsvorschriften vereinbart; sie sind allen Ausschreibungen und Bauverträgen zugrunde zu legen. Eine einheitliche Anwendung sollte zu einer weitgehend einheitlichen Absicherungspraxis führen. Damit werden auch die Risiken für den Anbieter im Rahmen eines entsprechenden Vertrages zur Sicherung einer Arbeitsstelle abschätzbar. Bau- und Verkehrssicherungsunternehmen können qualifizierte Angebote abgeben. Die zu den ZTV-SA 97 gehörenden „Technischen Lieferbedingungen“ sind bei der FGSV, Konrad-Adenauer-Straße 13, 50996 Köln, erhältlich.

Kirschbaum Verlag Bonn  
Telefax (02 28) 9 54 53 - 27  
Internet www.kirschbaum.de

