

## **Schadensdiagnose an Bauwerksoberflächen mit multispektralen Methoden**

M. Hemmleb, F. Weritz, C. Maierhofer,  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin;  
A. Schiemenz, Technische Universität Dresden

### **Abstract**

Für die bildgebende Schadenserfassung auf Bauwerksoberflächen wurde ein multispektrales Messverfahren entwickelt, welches mit Hilfe von vier Halbleiterlasern unterschiedlicher Wellenlänge, einer Detektionseinheit und einem Ablenkensystem die Reflexionseigenschaften des Untersuchungsobjekts flächenhaft erfasst. Die Auswahl der Laserwellenlängen erfolgte nach Anforderung an die Schadensdetektion (Wasser- und Chlorophyllabsorption) und nach der Marktsituation. Daher wurden die Wellenlängen 670, 808, 980 und 1930 nm verwendet. Ergebnis einer Messung ist zunächst ein Datensatz mit den gemessenen Reflexionswerten, aus dem ein multispektraler Bilddatensatz erzeugt wird. Neben einer Dokumentation der Ergebnisse wird automatisch der Vegetations- und Feuchteindex berechnet. Zusätzlich stehen die multispektralen Bilddaten einer Multispektralklassifizierung mit kommerzieller Software zur Verfügung.

### **1 Einleitung**

Die Zustandsuntersuchung im Vorfeld von Instandsetzungsarbeiten spielt eine entscheidende Rolle bei der Planung von Bau- bzw. Sanierungsmaßnahmen. Durch die Vielzahl der an Bauwerksoberflächen auftretenden Schäden ist eine Schadenskartierung häufig aufwändig und zeitraubend. Für die Schadenserfassung sind daher bildgebende Verfahren zu entwickeln, welche auch an unzugänglichen Stellen den Zustand der Bauwerksoberfläche erfassen und Daten für eine weitere Analyse und Klassifizierung der vorhandenen Schäden bereitstellen.

Neben der Oberflächenstruktur und -beschaffenheit sind vor allem deren Veränderungen, z.B. in Form von Verwitterung, Korrosion und Salzausblühungen zu detektieren. Besondere Bedeutung besitzt die Erfassung und Analyse von Feuchtigkeit und biologischen Veränderungen (Moose, Flechten, Schimmelpilze etc.).

Multispektraltechniken bieten die Möglichkeit, Schäden und insbesondere Feuchtigkeit und Bewuchs an Bauwerksoberflächen zu erkennen und flächenmäßig zu quantifizieren. Sie basieren auf der Messung der Reflexionseigenschaften der zu untersuchenden Oberfläche bei verschiedenen Wellenlängen, insbesondere im sichtbaren Bereich und im nahen Infrarot (NIR). Mit der Hilfe von Klassifizierungsmethoden, welche aus Anwendungen in der Geofernerkundung bekannt sind, können verschiedene Material- und Schadensklassen ermittelt werden. Die Resultate einer Multispektralauswertung können daher als Grundlage für eine Schadenskartierung verwendet werden.

Im Beitrag werden unterschiedliche Ansätze für die multispektrale Bildaufnahme und -auswertung erläutert. Anhand von Beispielen werden sowohl flächenhafte Aufnahmeverfahren, basierend auf der Kombination von Digitalkamerabildern und NIR-Bilddaten, als auch ein scannendes Verfahren vorgestellt. Dabei handelt es sich

um einen multispektralen Laserscanner, eine Neuentwicklung im Rahmen eines Forschungsvorhabens in der Fachgruppe VIII.2 „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

## **2 Überblick über Multispektraltechniken für die Bauwerksdiagnose**

Multispektraltechniken beruhen auf der Messung der optischen Reflexionseigenschaften der zu untersuchenden Bauwerksoberfläche bei verschiedenen Wellenlängen. Wird eine breitbandige künstliche Lichtquelle oder das natürliche Umgebungslicht verwendet, erfolgt die Trennung der einzelnen Kanäle zumeist mit optischen Filtern. Dazu wird eine entsprechende Kamera beispielsweise mit einem Filterrad [Art Innovation 2005] oder neuerdings auch mit elektronisch durchstimmbaren Filtern versehen [CRI 2005], [Mansfield 2002]. Als Aufnahmesysteme kommen vor allem CCD-Kameras in Frage, bei welchen der Spektralbereich nicht herstellerseitig eingeschränkt ist. Bei Verwendung einer Silizium-basierten CCD-Matrix lässt sich ein Spektralbereich von ca. 400 bis 1000 nm erfassen. Für die Aufnahme im Infrarot (IR) sind spezielle Aufnahmesysteme erforderlich. Traditionell können dafür Vidikon-Kameras verwendet werden, bei denen die Abbildung auf der Abtastung einer IR-empfindlichen Schicht (z.B. aus Bleisulfid) mittels eines Elektronenstrahls beruht. Seit kurzem sind auch CCD-basierte Kameras auf dem Markt, bei denen das lichtempfindliche Material aus Indium-Gallium-Arsenid besteht [Xenics 2005]. Diese Kameras liefern höher aufgelöste Bilder in besserer Qualität als die bislang häufig verwendeten Vidikon-Kameras.

Neben den Aufnahmesystemen, welche passiv eine breitbandige Lichtquelle für die Reflexionsmessung nutzen, gibt es aber auch die Möglichkeit, die Bauwerksoberfläche aktiv mit Licht einer definierten Wellenlänge zu bestrahlen und die Reflexionseigenschaften zu messen. Dabei bietet es sich an, auf die Erfahrungen der Entwickler und Hersteller von 3D-Laserscannern, welche einen Laser zur Entfernungsmessung verwenden, zurückzugreifen [Thomas, Wehr 2005]. Durch die Verbindung des scannenden Messprinzips mit einer Reflexionsmessung mit Lasern verschiedener Wellenlängen entsteht ein multispektraler Laserscanner. Im Gegensatz zu 3D-Laserscannern sind multispektrale Laserscanner derzeit nicht kommerziell verfügbar. Daher wurde für erste Untersuchungen auf der Basis dieses Messprinzips ein multispektraler Laserscanner in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung entwickelt.

Unabhängig vom verwendeten Aufnahmesystem stehen als Ergebnis einer Multispektralaufnahme mehrere Bildkanäle - also Bilddaten bei einer definierten Wellenlänge - zur Verfügung, welche anschließend weiterverarbeitet werden. Die Auswertung der Multispektraldaten erfolgt normalerweise mit Bildverarbeitungsmethoden aus der Geofernerkundung. Neben einer visuellen Begutachtung lassen sich erste Aussagen, z.B. zur Feuchte- und Chlorophyllverteilung, durch die Kombination der Bildkanäle treffen. Zur Ermittlung der Chlorophyllverteilung wird der Vegetationsindex (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) verwendet. Er verknüpft die Messwerte im nahen Infrarot, auf die sich die Vitalität der Vegetation durch das Minimum der Chlorophyllabsorption besonders auswirkt, mit den Messwerten im roten Spektralbereich, in dem das nicht der Fall ist. Damit kann auf einfache und wirkungsvolle Weise die Verteilung von Bewuchs auf Bauwerksoberflächen erfasst und visualisiert werden.

In Anlehnung an den NDVI kann ebenfalls der normalisierte Feuchteindex berechnet werden. Hierbei werden die Messwerte aus dem Bereich einer Wasserabsorptionslinie (z.B. bei 1430 nm oder 1940 nm) in Bezug zu den Messwerten einer Referenzwellenlänge, bei welcher die Messungen unempfindlich gegenüber dem Wassergehalt sind, gesetzt. Der berechnete Index ist also bei Vernachlässigung von Störeinflüssen auf die Messung ein Maß für den relativen Feuchtegehalt der Oberfläche des Untersuchungsobjektes.

Eine weitergehende Analyse der Daten hinsichtlich der Diagnose von Schäden an der untersuchten Bauwerksoberfläche erfordert eine Multispektralklassifizierung. Multispektrale Klassifizierungsmethoden beruhen darauf, dass bestimmte Objektklassen in Abhängigkeit von der Wellenlänge charakteristische Reflexionseigenschaften besitzen (Abb. 1). Überträgt man die in  $n$  Bildkanälen digitalisierten Intensitätswerte eines Objektpunktes in einen  $n$ -dimensionalen Merkmalsraum ( $n$  = Anzahl der verwendeten Wellenlängen), bildet sich für jede Objektklasse ein Cluster aus (Abb. 2). Bei einer unüberwachten Klassifizierung werden diese Cluster ohne weitere Vorkenntnisse identifiziert und abgegrenzt. Dagegen fließt bei einer überwachten Klassifizierung Vorwissen in Form von definierten Referenzflächen in die Auswertung ein und erlaubt somit quantitative Aussagen über die Verteilung der Objektklassen.

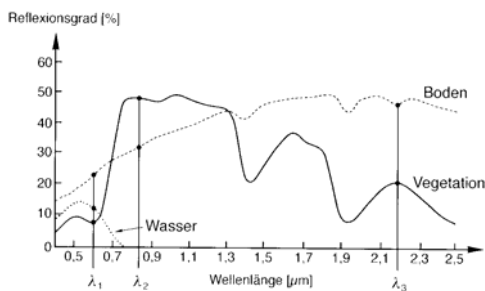


Abb. 1: Reflexionskurven für unterschiedliche Objektklassen [Albertz 2001]

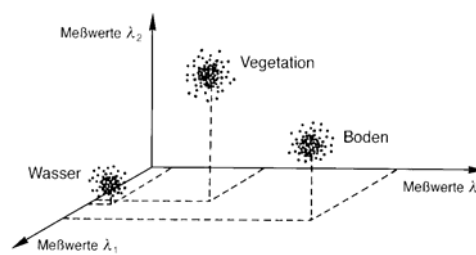


Abb. 2: Merkmalsraum zur Multispektralklassifizierung [Albertz 2001]

Erste Auswertungen auf der Basis einer Multispektralklassifizierung mit dem Ziel verschiedene Gesteins- und Schädigungsarten zu klassifizieren wurden von [Strackenbrock 1990] und [Godding 1992] vorgenommen. Durch die Verbindung multispektraler mit multitemporalen Datensätzen in einer überwachten Klassifizierung konnten die Ergebnisse und damit die Zuordnung der ermittelten Klassen zu den auftretenden Schäden weiter verbessert werden [Lerma 2001]. Methoden aus der Bildverarbeitung (Texturanalyse, Mustererkennung) bieten die Möglichkeit, erweiterte Informationen in Form von zusätzlichen Bildkanälen in die Multispektralklassifizierung einfließen zu lassen und tragen damit zu einer höheren Qualität der Ergebnisse bei. Dieser Ansatz wird auch für die Analyse von Fassaden historischer Bauten verwendet [Lerma 2000], [Ruiz 2002]. Neue Möglichkeiten bei der Auswertung multispektraler Bilddaten ergeben sich durch die Verbindung von Klassifizierungsmethoden mit objekt-orientierten Ansätzen. Hierzu wurden – zunächst primär für Klassifikationsaufgaben in der Fernerkundung – Werkzeuge entwickelt, welche zusätzlich zur multispektralen Information auch die Topologie der Objekte mit berücksichtigen. In [Neusch 2003] ist die Anwendung dieses Konzepts auf die Auswertung von Fassadenaufnahmen erläutert.

Wie bereits erläutert, können infrarotoptische Methoden auch für den Nachweis von Feuchtigkeit angewendet werden. In einer Reihe von Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass sich der Effekt, dass Wasser die Infrarotstrahlung in bestimmten Frequenzbereichen absorbiert und sich damit auch der Reflexionskoeffizient der Oberfläche ändert, für die Feuchtemessung ausnutzen lässt [Böttcher 1982], [Schickert 1983], [Geyer 1993], [Geyer 1995], [Büscher 1999], [Wiggenhauser 2002].

Die Kombination von IR-Sensoren unterschiedlicher Wellenlängenbereiche wird beispielsweise zur Inspektion von Tunneln bzw. Abwasserkanälen [Florin 1999], [Friedmann 2003] oder zur Oberflächeninspektion von Holz [Nestler 2000] verwendet.

### **3 Multispektralaufnahme und -auswertung mit Digitalkamera- und IR-Bilddaten**

#### ***3.1 Untersuchungsobjekte***

Bauwerksschäden an historischer Bausubstanz treten häufig an Ziegelmauerwerk oder Natursteinfassaden auf. Daher wurden für die Untersuchungen eine geschädigte Ziegelmauerwand und ein Gebäudesockel aus Sandstein ausgewählt.

Abb. 3 zeigt ein Gebäudeteil auf dem BAM-Gelände (Haus 25) mit stark geschädigtem Ziegelmauerwerk. Deutlich sind Schädigungen in Form von Feuchte und biologischem Bewuchs (Moos) zu erkennen. Der für die Aufnahmen ausgewählte Bereich enthält alte und neue Bausubstanz, sowie trockene und durchfeuchtete Gebiete. Ursache für die Schäden ist eine defekte Regenrinne oberhalb des untersuchten Bereichs in Verbindung mit einer fehlenden Regenwasserabdichtung der Mauerwerkskrone, was zu einer massiven Durchfeuchtung der Wand geführt hat.

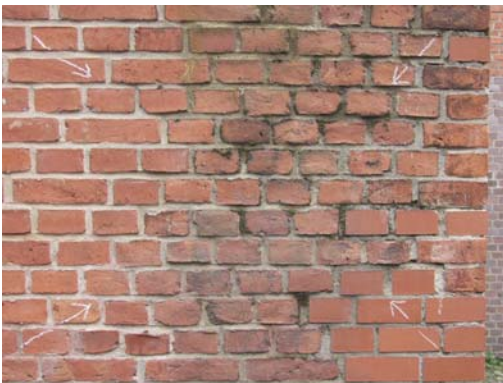


Abb. 3: Geschädigte Ziegelmauerwand



Abb. 4: Geschädigte Sandsteinwand

Als zweites Untersuchungsobjekt wurde ein geschädigter Gebäudesockel aus Sandstein auf dem Campus der TU Dresden ausgewählt (Abb. 4). Auf der Sandsteinwand sind deutlich erkennbare Schäden in Form von Moosbewuchs, Salzauslösungen, durchfeuchteten und verschmutzten Gebieten vorhanden. Ursache der Schäden ist hier aufsteigende Bodenfeuchte in Verbindung mit fehlender Austrocknungsmöglichkeit, da der Gebäudeteil in einem dauerhaft abgeschatteten Bereich liegt.

### **3.2 Aufnahmetechnik**

Für die Aufnahme der Untersuchungsobjekte kamen eine 1 Megapixel Fixfokus-Kamera (Kodak DC 3200) und zwei professionelle Digital-Spiegelreflexkameras (Olympus E20P und Nikon D100) zum Einsatz. Bei allen Kameras wurde eine Auflösung von ca. 1 Megapixel verwendet. Obwohl die Kodak DC 3200 keine verlustfreie Komprimierung der Bilder anbietet, waren hinsichtlich der Multispektralauswertung der Bilddaten keine wesentlichen Unterschiede zwischen den verwendeten Kameras festzustellen.

Für die IR-Aufnahme wurde eine Vidikon-Kamera vom Typ Hamamatsu C2400-03 verwendet. Die Kamera besitzt einen Adapter, welcher die Bildaufnahme mit passenden Filtern ermöglicht. Bei der Auswahl der Filter ist darauf zu achten, dass sie eine Mindestbandbreite besitzen, damit noch ein brauchbares Signal-Rausch-Verhältnis im Bild vorhanden ist. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Wellenlängenbereiche der Vidikon-Röhre, des verwendeten Objektivs und der Filter aufeinander abgestimmt sind. Daher wurden nur vier Wellenlängen für die Multispektralklassifizierung ausgewählt (850, 900, 950, 1000 nm). Durch die Verwendung eines handelsüblichen externen USB-Framegrabbers können die Bilddaten direkt auf einem Notebook gespeichert und ausgewertet werden.

Bei der Aufnahme wurde darauf geachtet, dass möglichst diffuse Beleuchtung vorhanden ist (wolkiger Himmel), um Einflüsse durch anisotrope Ausleuchtung der Fläche durch die Sonne weitgehend auszuschließen. Bei Verwendung eines Objektivs mit 23 mm Brennweite betrug die Aufnahmeentfernung ca. 3 m.

### **3.3 Auswertung**

Zunächst wurden die vorliegenden Multispektraldatensätze sowohl der Digitalkameras (3 Kanäle, RGB) als auch der Vidikon-Kamera (4 Kanäle, s.o.) getrennt mit einer Multispektralklassifizierung ausgewertet. Während sich bei den Digitalkamerabilddaten bereits brauchbare Ergebnisse ergaben, war dieses bei den Vidikon-Bilddaten wegen des kleinen Spektralbereichs und der hohen Korrelation der einzelnen Kanäle nicht der Fall. Ursache für die hohen Korrelationen ist die große Bandbreite der Filter (100 nm). Wegen des schlechten Signal-Rausch-Verhältnisses des Vidikon-Aufnahmesystems ist die Verwendung von Filtern mit geringerer Bandbreite aber nicht zu empfehlen. Um bessere Ergebnisse zu erzielen, wurden daher die Digitalkameradaten mit den IR-Bilddaten verknüpft. Dazu wurden die Datensätze mittels einer Polynomtransformation 2. Grades aufeinander registriert und mit einer bilinearen Interpolation resampelt. Wegen der hohen Korrelation zwischen den IR-Kanälen wurde für die IR-Bilder eine Hauptachsentransformation (Principal Component Analysis, PCA) berechnet.

Für die Ziegelmauerwand wurde weiterhin der Vegetationsindex aus dem IR-Kanal mit 850 nm und dem Rot-Kanal der Digitalkameradaten berechnet. Um weitere Informationen über die untersuchte Oberfläche zu erhalten, wurde zusätzlich ein Texturkanal berechnet, welcher die Homogenität der Objekte beschreibt. Somit standen bis zu sechs Kanäle für die Klassifizierung der Ziegelmauerwand zur Verfügung (RGB-Kanäle, Infrarot aus PCA, NDVI und Texturkanal).

Bei der Sandsteinwand wurde wegen der geringeren Dynamik der IR-Bilddaten die erste Hauptkomponente für die Berechnung des NDVI verwendet. Die aufgenom-

menen Sandsteine besitzen nur geringe Unterschiede hinsichtlich ihrer Materialoberfläche, was sich im Bild in einer geringen Varianz der Texturwerte widerspiegelt. Daher wurde auf die Berechnung des Homogenitätskanals verzichtet.

Für die Auswertung wurden sowohl pixelbasierte Methoden als auch ein objektorientierter Ansatz verwendet. ERDAS Imagine bietet als Software für die pixelbasierte Multispektralklassifizierung eine Reihe verschiedener Module an. Wegen ihrer Robustheit wurde eine Clusteranalyse auf der Basis des ISODATA-Algorithmus (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) für die unüberwachte Klassifizierung ausgewählt. Bei der überwachten Klassifizierung werden Referenzflächen (sogenannte Trainingsgebiete) ausgewählt, welche die spektrale Signatur der jeweiligen Objektklasse definieren. Für die überwachte Klassifizierung wurde das Maximum-Likelihood-Verfahren verwendet, welches ebenfalls in der verwendeten Software ERDAS Imagine zur Verfügung steht.

Für die Multispektralklassifizierung mit einem objektorientierten Ansatz stand die Software eCognition zur Verfügung. Bei diesem Ansatz wird zunächst eine Segmentierung des Bildes in homogene Segmente vorgenommen. Diese stehen dann für eine Klassifizierung bereit. Neben den spektralen Eigenschaften können zusätzlich eine Reihe weiterer Eigenschaften der Segmente bei der Klassifizierung berücksichtigt werden, z.B. Geometrie- und Nachbarschaftsbeziehungen. Dieser Ansatz ermöglicht also das Einbringen von Vorwissen in Form eines semantischen Modells und führt daher bei konsequenter Anwendung zu besseren Klassifikationsergebnissen.

### **3.4 Ergebnisse**

#### **3.4.1 Ziegelmauerwand**

Abb. 6 und Abb. 7 zeigen die Ergebnisse der pixelbasierten Klassifizierung der Ziegelmauerwand. Wie zu erwarten, ist der Bewuchs (im Bild grün dargestellt) deutlich klassifizierbar, da das Minimum der Chlorophyllabsorption durch die IR-Aufnahme erfasst ist. Da der Spektralbereich der Vidikonkamera nicht bis zu den Wasserabsorptionsbanden reicht, beruht die Detektion der Feuchte auf Helligkeitsunterschieden an der Objektoberfläche. Die eindeutige Veränderung der spektralen Eigenschaften (Abb. 8) führt aber auch hier zu einer brauchbaren Klassifikation der feuchtegeschädigten Ziegel (im Bild hellblau bis blau dargestellt).



Abb. 6: Ergebnis der unüberwachten pixelbasierten Klassifizierung (Clusteranalyse)



Abb. 7: Ergebnis der überwachten pixelbasierten Klassifizierung (Maximum-Likelihood)

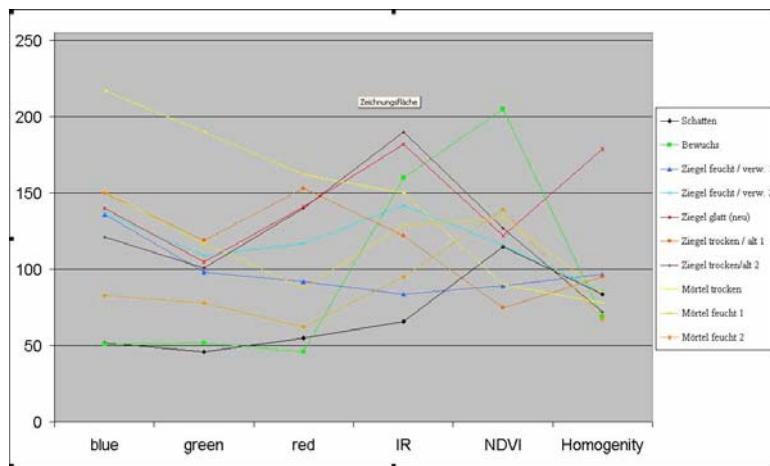


Abb. 9: Signaturanalyse der für die überwachte Klassifizierung verwendeten Objektklassen

Der objektbasierte Ansatz liefert vergleichbare Ergebnisse. Im Gegensatz zum pixelbasierten Ansatz werden hier aber Ziegel, Mörtel und geschädigte Bereiche als eigenständige Objekte erfasst. So bietet die zusätzliche Information aus dem Texturkanal die Möglichkeit, neue, alte und witterungsgeschädigte Ziegel zu unterscheiden (Abb. 10). Zusätzlich werden bei dem objektorientierten Ansatz Salzausblühungen erkannt (weiße Bereiche in Abb. 11).



- Bewuchs
- Ziegel verwittert
- Ziegel ungeschädigt
- Ziegel erneuert
- Mörtel

Abb. 10: Ergebnis der objektbasierten Klassifizierung, Klassifikation von verwitterten, ungeschädigten Originalziegeln und neuen Ziegeln

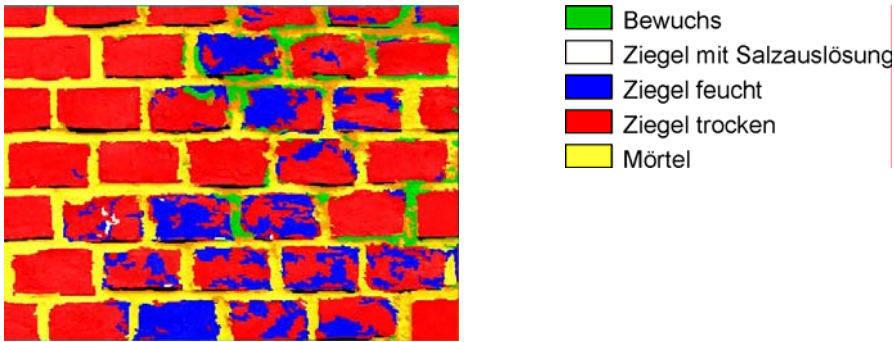


Abb. 11: Ergebnis der objektbasierten Klassifizierung, Klassifikation von Feuchte, Bewuchs und Salzausblühungen

### 3.4.2 Sandsteinwand

Die Ergebnisse einer pixelbasierten Klassifizierung der Sandsteinwand sind in Abb. 13 und Abb. 14 dargestellt. Im Gegensatz zum weitgehend ungeschädigten Sandstein (gelb) sind deutliche Schäden in Form von Bewuchs (grün), Verwitterung (grau) und Salzausblühungen (weiß) zu erkennen. Bei der überwachten Klassifizierung sind zusätzlich verschmutzte Bereiche (braun) und Bewuchs im Vordergrund (hellgrün) erkannt worden.

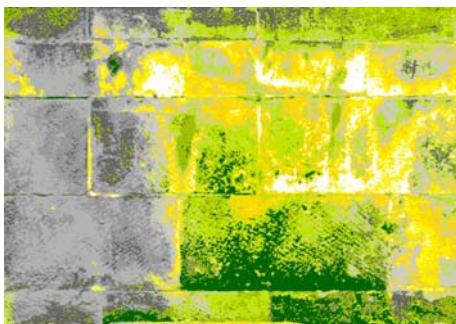


Abb. 13: Ergebnis der unüberwachten pixelbasierten Klassifizierung (Clusteranalyse)

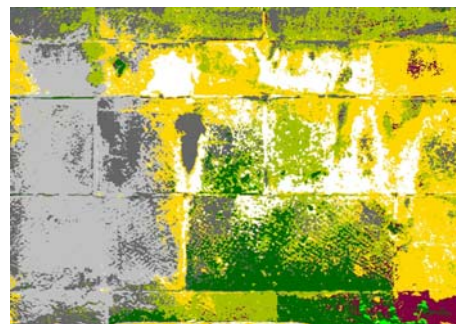


Abb. 14: Ergebnis der überwachten pixelbasierten Klassifizierung (Maximum-Likelihood)

Beim objektorientierten Ansatz wurde als Ersatz für den Texturkanal zusätzlich eine Fugenkartierung verwendet. Dadurch ist die Abgrenzung einzelner Sandsteinquader und die Unterteilung der Fugen in offene und gefüllte möglich. Das Ergebnis (Abb. 15) ist mit den Resultaten der überwachten pixelbasierten Klassifizierung vergleichbar. Der objektorientierte Ansatz bietet aber den Vorteil, dass sich die detektierten Schäden den Objekten, in diesem Falle den Sandsteinquadern, zuordnen lassen. In beiden Fällen ist die Unterscheidung zwischen verwittertem und ungeschädigtem Sandstein schwierig. Trotz der Verwendung zusätzlicher Beleuchtung dürfte sich der Einfluss der von rechts nach links zunehmenden Beschattung negativ auf die Trennung dieser Klassen auswirken.



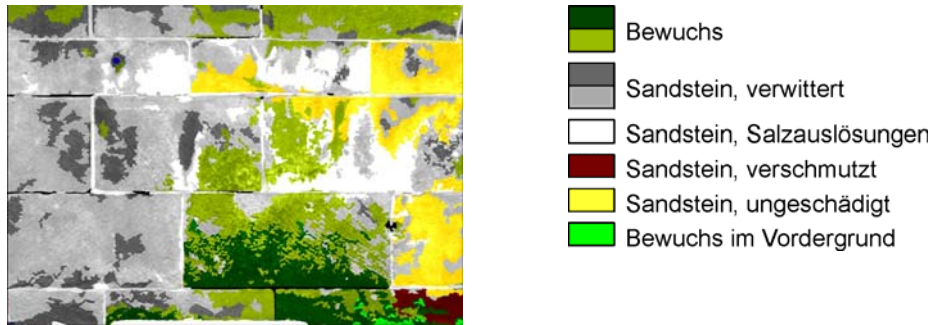


Abb. 15: Ergebnis der objektorientierten Klassifizierung

## 4 Multispektraler Laserscanner

### 4.1 Entwicklung des Multispektralen Laserscanners

Der multispektrale Laserscanner als ein System für flächenhafte multispektrale Reflexionsmessungen setzt sich aus einer definierten Strahlquelle, einer Detektionseinheit, einem Ablensystem und integrierenden Komponenten zusammen (Abb. 16). Als Strahlquelle wird ein Lasersystem verwendet, welches aus vier fasergekoppelten Halbleiterlasern besteht. Die Auswahl der Laserwellenlängen richtete sich nicht nur nach den Bedürfnissen der Schadensdetektion (Wasser- und Chlorophyllabsorption), sondern auch nach der Marktsituation. Derzeitig werden die Wellenlängen 670, 808, 980 und 1930 nm verwendet. Die Detektionseinheit besteht aus Si- und InGaAs-Fotodioden mit zugehöriger Empfangsoptik. Die damit empfangenen Signale werden verstärkt und digital erfasst. Die Steuerung des Gerätes und die Datenerfassung erfolgt zentral von einem Notebook. Ergebnis einer Messung ist zunächst ein Datensatz mit den gemessenen Reflexionswerten, aus dem ein multispektraler Bilddatensatz erzeugt wird. Neben einer Dokumentation der Ergebnisse wird automatisch der Vegetations- und Feuchteindex berechnet. Zusätzlich können die multispektralen Bilddaten mit einer Multispektralklassifizierung mit kommerzieller Software ausgewertet werden.

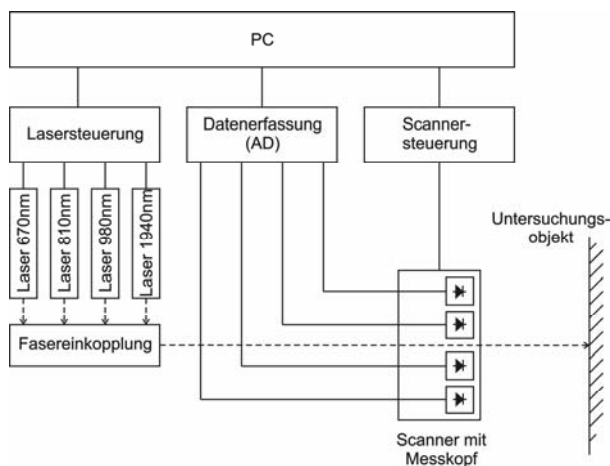


Abb. 16: Prinzipieller Aufbau des multispektralen Laserscanners



Abb. 17: Messkopf des multispektralen Laserscanners

Der multispektrale Laserscanner steht derzeit für Messungen im Labor zur Verfügung (Abb. 17). Einschränkungen existieren noch hinsichtlich der Aufnahmeentfernung und der Aufnahmezeiten bzw. der damit verbundenen Auflösung.

#### **4.2 Messungen und Ergebnisse**

Nach der Fertigstellung des multispektralen Laserscanners absolvierte das System zunächst eine Reihe von Test- und Kalibrierungsmessungen. Dabei wurde sowohl die radiometrische und geometrische Stabilität des gesamten Systems untersucht, als auch die Rahmenbedingungen und Einstellwerte für den Einsatz des Laserscanners ermittelt. Dazu wurden die Reflexionseigenschaften einer Anzahl von Baustoffen, insbesondere von historischen Materialien, im trockenen und feuchten Zustand sowie mit verschiedenen Oberflächeneigenschaften gemessen. Nach dem erfolgreichen Abschluss dieser ersten Untersuchungen stand der multispektrale Laserscanner für Multispektralmessungen von Baustoffoberflächen zur Verfügung.

Als erstes Untersuchungsobjekt wurde eine Wand aus z.T. durchfeuchteten Ziegelsteinen ausgewählt (Abb. 18). Zur Bestimmung der Oberflächenfeuchteverteilung wurde ein Multispektralscan von  $3 \times 4$  Miniaturziegeln (Kantenlänge ca. 5 cm) durchgeführt. Zunächst erfolgte eine Aufnahme im trockenen Zustand. Anschließend wurden zwei Ziegel gewässert und eine erneute Aufnahme durchgeführt. Neben den vier Bildkanälen wurde aus den Reflexionswerten unmittelbar der Oberflächenfeuchteindex berechnet. Dabei dienten die Reflexionswerte bei  $\lambda = 980 \text{ nm}$  als Referenz zur Messung bei  $\lambda = 1930 \text{ nm}$ , welche nahe bei der Wasserabsorptionslinie liegt.



Abb. 18: Ziegelwand  
(z.T. durchfeuchtet),  
Aufnahme mit Digitalkamera

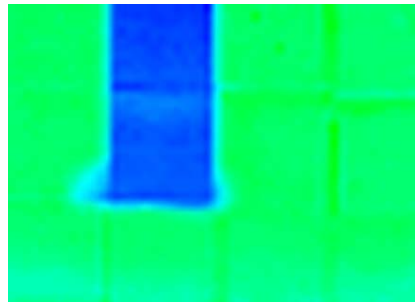


Abb. 19: Relative Oberflächen-  
feuchteverteilung der Ziegelwand  
(aus Multispektralscan)

In Abb. 19 sind deutlich die durchfeuchteten Flächen zu erkennen. Ein Teil der Feuchte ist in die benachbarten Ziegel eingedrungen. Im Vergleich zu dem Foto der Ziegel (Abb. 18) ist außerdem zu erkennen, dass die aus wechselnder Oberflächenbeschaffenheit hervorgerufenen Kontrastunterschiede, die denen durch Feuchte hervorgerufenen ähnlich sind, im Feuchteindexbild verschwinden. Die verbleibenden geringfügigen Helligkeitsunterschiede im Bereich der Fugen sind ebenso wie die Aufhellung im unteren Bildbereich auf gerichtete Reflexionsanteile der Laserstrahlung an Kanten bzw. Doppelreflexion am Probenstisch zurückzuführen. Die in Abb. 19 wiedergegeben Farbwerte repräsentieren die relative Feuchteverteilung im oberflächennahen Bereich. Für eine Berechnung der absoluten Feuchtwerte ist

eine Kalibrierung des Messsystems mit einem Referenzfeuchtemessverfahren notwendig.

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Multispektraltechniken sind ein vielversprechendes Werkzeug zur Diagnose und Kartierung von Schäden an Bauwerksoberflächen. Bei Verwendung eines entsprechenden Spektralbereichs lassen sich Vegetation und Feuchte klassifizieren. Darüber hinaus ist unter bestimmten Voraussetzungen eine Trennung von Materialklassen und chemischen Veränderungen möglich.

Die Verwendung von auf Flächensensoren basierenden bildgebenden Verfahren (Digitalkameras, Vidikon-Kamera) bietet die Möglichkeit, die zu untersuchende Fläche schnell zu erfassen. Durch die Fusion von Digitalkamera- und IR-Daten lässt sich die Klassifizierung der detektierten Schäden deutlich verbessern. Bei der Auswertung der Daten zeigte sich, dass der objektorientierte Klassifizierungsansatz einige Vorteile verspricht: Er bietet die Möglichkeit, die aufgenommenen Daten je nach Aufgabenstellung zu werten, Abhängigkeiten zu definieren und damit gezielt für konkrete Fragestellungen zu verwenden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, deutlich mehr Vorinformationen in die Auswertung einfließen zu lassen und damit eine höhere Qualität der Ergebnisse zu erreichen.

Um die bei kamerabasierten Multispektralaufnahmen bestehenden Unsicherheiten bezüglich der Beleuchtung zu überwinden, wurde ein multispektraler Laserscanner entwickelt. Erste Messungen mit dem multispektralen Laserscanner verliefen erfolgreich. Durch die Verwendung von Lasern mit definierten Wellenlängen in Verbindung mit passenden Detektoren können Schäden gezielt ermittelt und Störeinflüsse ausgeschaltet werden. Schäden wie Feuchte und Bewuchs lassen sich automatisiert flächenhaft erfassen. Neben den derzeit noch hohen Anschaffungskosten sind für den effizienten Einsatz eines multispektralen Laserscanners zur Ermittlung von Bauwerksschäden aber weitere Anstrengungen, insbesondere zur Optimierung des Systems, erforderlich. Bereits jetzt zeigen die vorgestellten Ergebnisse aber das große Potential multispektraler Messtechniken für die Schadensdiagnose an Bauwerksoberflächen, insbesondere zur Erfassung von Feuchteschäden.

## **Danksagung**

Das Forschungsvorhaben „Einsatz eines multispektralen Laserscanners zur Untersuchung von Bauwerksoberflächen“ wurde mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) gefördert (Aktenzeichen: Z 6 - 10.07.03 / II 13 - 80010310).

## **Literatur**

[Albertz 2001] Albertz, J.: Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 2. Auflage 2001, 250 Seiten.

[Art Innovation 2005] Produktinformation Artist Pro, [www.art-innovation.nl](http://www.art-innovation.nl)

[Böttcher 1982] Böttcher, B., Richter, H.: Ein Beitrag zum Nachweis von Feuchtigkeit in Mauerwerk mit Hilfe einer Infrarotkamera. Materialprüfung Nr. 1, 24, 1982, S. 5-9.

[Büscher 1999] Büscher, K. A., Wild, W., Wiggerhauser, H.: Feuchtemessung mit infraroptischen Methoden. Feuchtetag 1999, DGZfP-Berichtsband BB 69-CD, M2, 1999, S. 1-15.

[CRI 2005] Produktinformation Nuance, [www.cri-inc.com](http://www.cri-inc.com)

[Florin 1999] Florin, C.: Feuchtedetektion mit Hilfe der Infrarot-Technik. Feuchtetag 1999, DGZfP-Berichtsband BB 69-CD, P9, 1999, S. 1-12.

[Friedmann 2003] Friedmann, M.: Zerstörungsfreie flächenmäßig erfassbare Ortung von Hohlstellen und Feuchtigkeitsbelastungen mittels Infrarot-Thermografie. 14. Hanseatische Sanierungstage, Warnemünde, Schriftenreihe des Feuchte- und Altbausanierung e.V., Heft 14, 2003, S. 61-70.

[Geyer 1993] Geyer, E., Arndt, D., Vogel, L.: Bestimmung des Remissionsgrades von trockenen und befeuchteten Baustoffen im Wellenlängenbereich 1,3 bis 13  $\mu\text{m}$  für die IR-reflektometrische Ermittlung von Oberflächenfeuchte. Feuchtetag 1993, Berlin, DGZfP-Berichtsband 40, 1994, S. 223-231.

[Geyer 1995] Geyer, E., Arndt, D., Günther, B.: Bestimmung der Reflexion von trockenen und befeuchteten Baustoffen im Wellenlängenbereich 0,3 bis 2,5  $\mu\text{m}$  für die IR-optische Bestimmung der Feuchte. Feuchtetag 1995, BAM, Berlin (1995) S. 176-184.

[Godding 1992] Godding, R., Sacher, G., Siedler, G.: Einsatz von digitalen Aufnahmesystemen zur Gewinnung von Multispektralaufnahmen für die Erkundung von Bauwerksschäden. ISPRS Com.V, New York, 1992, S. 794-798.

[Lerma 2000] Lerma, J. L., Ruiz, L. A., Buchon, F.: Application of spectral and textural classifications to recognize materials and damages on historic building facades. IAPRS, Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam, 2000, S. 480-483.

[Lerma 2001] Lerma, J. L.: Multiband Versus Multispectral Supervised Classification of Architectural Images. Photogrammetric Record, Volume 17, Issue 97, 2001, S. 89 ff.

[Mansfield 2002] Mansfield, J. R., Attas, M., Majzels, C., Cloutis, E., Collins, C., Mantsch, H. H.: Near infrared spectroscopic reflectance imaging: a new tool in art conservation. Vibrational Spectroscopy 28, 2002, S. 59-66.

[Nestler 2000] Nestler, R., Franke, K.-H.: Realisierung eines multisensorischen Ansatzes zur Oberflächeninspektion von Holz. 6. Workshop Farbbildverarbeitung, GfAI, Berlin 2000.

[Neusch 2003] Neusch, T., Grussenmeyer, P.: Remote Sensing Object-Oriented Image Analysis Applied to Half-Timbered Houses. Proceedings of the XIX. Int. Symp. CIPA Heritage Documentation, Antalya, 2003, 4 Seiten.

[Ruiz 2002] Ruiz, L.A., Lerma, J. L., Gimeno, J.: Application of Computer Vision Techniques to Support in the Restoration of Historical Buildings. ISPRS Commission III Symposium, Vol. XXXIV, Part 3A+B, 2002, 4 Seiten.

[Schickert 1983] Schickert, G., Böttcher, B.: Anwendung der IR-Thermographie bei der Untersuchung von Bauschäden. Berichtsband Int. Koll. "Werkstoffwissenschaften und Bausanierung", Technische Akademie Esslingen, 9/1983, S. 25-31.

[Strackenbrock 1990] Strackenbrock, B., Sacher, G., Grunicke, J.-M.: Image Processing for Mapping Damages to Buildings. Proceedings of the XIII. Int. Symp. CIPA Heritage Documentation, Cracow, 1990, 7 Seiten.

[Thomas, Wehr 2005] Thomas, M., Wehr, A.: Possibilities of multi-spectral laser scanners. Optical 3D-Measurement Techniques VII, Wien, 2005.

[Wiggenhauser 2002] Wiggenhauser, H.: Active IR-applications in civil engineering. Infrared Physics and Technology 43, 2002, S. 233-238.

[Xenics 2005] Produktinformation XEVA, [www.xenics.com](http://www.xenics.com)