

# Bewertung von Farbmustercodes zur flächigen, aktiven 3D-Erfassung

Rainer Jahn, Daniel Kapusi, Darko Vehar, Rico Nestler, Karl-Heinz Franke

Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung (ZBS) e. V.,  
Werner-von-Siemens-Str. 10, D-98693 Ilmenau  
eMail: [info@zbs-ilmenau.de](mailto:info@zbs-ilmenau.de)  
URL: <http://www.zbs-ilmenau.de>

**Zusammenfassung.** Der Beitrag untersucht die Nutzung von Farbmuster-codes zur aktiven Stereoskopie an einem Anwendungsfall der 3D-Oberflächenprofilometrie. Zur Messwertverarbeitung wurden eigene Algorithmen des ZBS eingesetzt. Die Funktionsfähigkeit konnte mit einem Laborgerät nachgewiesen werden, das einen handelsüblichen DLP-Projektor zur Erzeugung des Farbmusters enthält. Es wurden Versuche zur Vereinfachung und Miniaturisierung des Messaufbaus durchgeführt, bei denen der DLP-Projektor durch einen Festmusterprojektor ersetzt wurde. Probleme bei der Realisierung des Festmusters durch einen Objektträger mit farbiger Transparenzstruktur werden im Beitrag beschrieben.

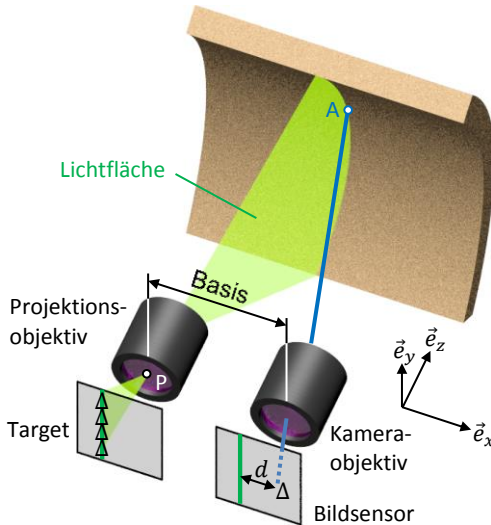
## 1 Aufgabe und Messverfahren

Dieser Arbeit liegt die Aufgabe zugrunde, die Innenseite von Rohren aus Beton als Bestandteil einer umfangreichen Defektprüfung dreidimensional zu vermessen. Jede Einzelmessung soll flächenhaft erfolgen und einen möglichst großen Winkel auf dem Rohrumfang erfassen.

Als prinzipiell geeignetes Verfahren bietet sich die aktive Stereoskopie an, die im einfachsten Fall durch starre Kombination eines Musterprojektors und einer Kamera realisiert wird. Die aktive Stereoskopie entwickelt das bekannte Lichtschnittprinzip dahingehend weiter, dass nicht nur eine einzelne Linie, sondern eine Vielzahl paralleler Strukturen flächig auf das Messobjekt projiziert wird. Damit entfällt der beim Lichtschnitt übliche Scan-Prozess und die höhere Messgeschwindigkeit erweitert die Anwendungsmöglichkeiten wesentlich.

Das Messprinzip ist in Abb. 1 dargestellt. Beispielhaft ist die Projektion einer ausgewählten Linie von einem Target aus durch das Projektionszentrum P eingezeichnet. Auf der Messfläche erscheinen die Linien in Abhängigkeit vom Oberflächenprofil gekrümmt. Dieses Liniemuster wird mit der Kamera aufgenommen und mittels Triangulation ausgewertet. Bei entsprechender Kalibrierung des Messaufbaus ergeben sich die Koordinaten eines Oberflächenpunktes A aus der seitlichen Verschiebung (Disparität  $d$ ) seines Bildpunktes in der Kamera.

Um die Vielzahl der Projektionslinien im Bild unterscheiden zu können, werden sie in eindeutiger Weise durch Farb- oder Grauwertmuster codiert. In Abb. 1 ist symbolisch das Codewort  $\Delta$  einer Projektionslinie eingetragen. Es werden zwei Grundprinzipien der Codierung unterschieden. Beim ersten Prinzip, der *zeitlichen Codierung*, entsteht das Codewort an jeder Stelle durch zeitlich aufeinanderfolgende Projektion



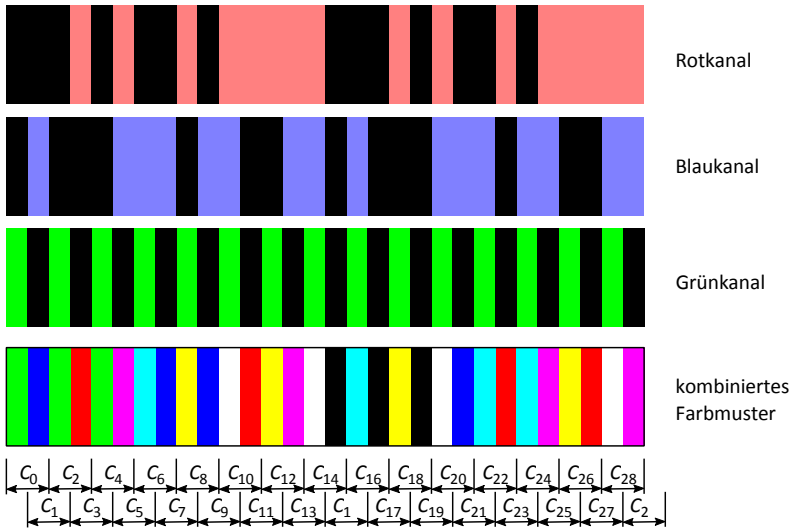
**Abb. 1.** Prinzip der aktiven Stereoskopie

verschiedener ebener Strukturen. Während der Projektionssequenz muss die Relativlage zwischen Messobjekt und Messsystem konstant bleiben. Beim zweiten Prinzip, der *räumlichen Codierung*, wird nur eine Struktur projiziert und eine bestimmte Anzahl benachbarter Strukturelemente bilden jeweils ein Codewort. Dieses Verfahren ist toleranter gegenüber Objekt- und Kamerabewegungen; die räumliche Ausdehnung der Codewörter wirkt sich jedoch nachteilig auf die laterale Auflösung der Messaussagen aus. Einen Überblick über räumliche und zeitliche Codierverfahren mit strukturierterm Licht geben Salvi u. a. [1]. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit einer Form der räumlichen Codierung mittels Farbstreifen und ihren Anwendungsmöglichkeiten auf die o. g. Messaufgabe.

## 2 Musterentwurf zur Farbstreifencodierung

Relevante Farbstreifencodierungen werden von Navarro [2] und Modrow [3] behandelt. Navarro ordnet verschiedenen Farbwinkeln des HSV-Raumes 6 Symbole zu, die Streifenposition wird im V-Kanal sinuscodiert. Modrow verwendet stattdessen RGB-codierte Symbole, deren Position durch Kantenanalyse bestimmt wird.

Für unsere Anwendung ist vorerst eine Menge aus 30 Codewörtern mit einer mittleren Breite von 12 Kamerapixeln je Codewort ausreichend. Wir verwenden zweistellige Codewörter, d. h. die oben erläuterten Projektionslinien werden aus je zwei Farbstreifen (Symbolen) zusammengesetzt. Für die Alphabetlänge  $m$  eines Symbols muss gelten:  $m \geq \sqrt{30} \approx 5,48$ . Ein Alphabet der Länge 8, das durch Kombination der Grundfarben RGB gebildet wird, ist also ausreichend. Abb. 2 zeigt die Einzelheiten dieser Codierung.



**Abb. 2.** Farbcodierung für aktive Stereoskopie

Wir bilden zunächst 15 Codeworte nur aus den Grundfarben rot und blau, also aus einem eingeschränkten Alphabet von vier Symbolen. Die Codeworte werden in einer so genannten *De-Bruijn-Sequenz* angeordnet, bei der das zweite Symbol eines Codeworts mit dem ersten Symbol des jeweils nächsten Codeworts übereinstimmt. Folglich beginnt nach jedem Symbol ein neues Codewort und es wird die maximale laterale Messpunktdichte erreicht. In Abb. 2 ist die Ausdehnung der Codeworte  $C_0$  bis  $C_{29}$  durch Maßpfeile markiert.  $C_{29}$  schließt das erste Symbol des periodisch fortgesetzten Farbmusters ein. Um eine Gesamtlänge von 30 Codeworten zu erhalten, wird die beschriebene Sequenz im Rot- und Blaukanal wiederholt. Eindeutigkeit wird mit Hilfe des Grünkanals hergestellt, der aus abwechselnd hellen und dunklen Streifen besteht, sodass nach den ersten 15 Codeworten ein Paritätswechsel auftritt. Eine weitere Motivation für diesen speziellen Grünkanal wird in Abschnitt 4 erläutert.

Die Länge der Sequenz in Abb. 2 wurde so gewählt, dass sie den möglichen Disparitätsbereich für eine praktisch relevante Klasse von Messobjekten abdeckt (Disparitätslimit). Es ist damit zulässig, die Sequenz auf dem Target bis zur benötigten Breite periodisch zu wiederholen.

### 3 Versuchsaufbau

**Projektor.** Für Versuchszwecke wird ein handelsüblicher Projektor mit Mikrospiegel-Array (DLP) eingesetzt, um beliebige Beleuchtungsmuster bequem testen zu können.



**Abb. 3.** Laborversion des aktiven Stereo-Messsystems; links einzeln (Kamera oben, Projektor unten); rechts zusammen mit einem Teil des Messobjekts

Die wichtigsten Projektordaten sind:

Pixelzahl:	1920 x 1080
Pixelabstand:	5,4 $\mu\text{m}$
Feldwinkel (FOV):	47,1° x 27,5°
Lichtquelle:	3 LEDs RGB

**Kamera.** Die geometrisch-optischen Daten der eingesetzten Industrie-Farbkamera sind:

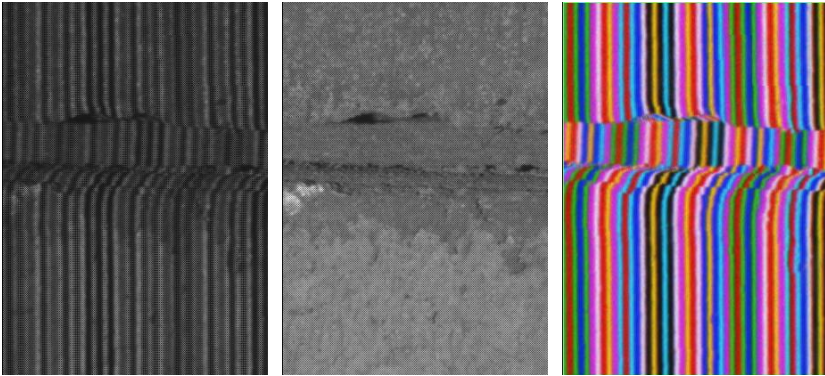
Sensortyp:	CCD mit Bayer-Filter, 2/3 Zoll
Pixelzahl:	2448 x 2048 (genutzt: $\approx 1520 \times 850$ )
Pixelabstand:	3,45 $\mu\text{m}$
Feldwinkel (FOV):	70,3° x 61° (genutzt: 47,1° x 27,5°)

Da das Objektiv im Versuchsaufbau nicht für 2/3-Zoll-Sensoren ausgelegt ist, kann nur ein Teil der Sensorfläche genutzt werden. Das Leuchtfeld des Projektors schöpft jedoch das vom Objektiv abbildbare Feld fast exakt aus. Mittels API des Herstellers kann auf die Rohdaten der Kamera zugegriffen werden, was eine eigene Farbinterpolation ermöglicht.

**Labormessgerät.** Das vorläufig eingesetzte aktive Stereo-Messsystem ist in Abb. 3 dargestellt. Es besteht aus Projektor und Kamera, die zu einer Standard-Stereo-Anordnung mit parallelen optischen Achsen ausgerichtet sind. Der Basisabstand beträgt 78 mm, die Steuerung erfolgt über einen Laptop. Bildauswertung und Berechnung der 3D-Daten werden noch offline durchgeführt.

**Messvorgang.** Es werden drei Bilder in einem kurzen Zeitabstand aufgenommen:

- *Musterbild*, bei dem der DLP-Projektor mit dem beschriebenen Farbmuster angesteuert wird,
- *Hellbild*, bei dem alle Lichtquellen eingeschaltet und alle Mikrospiegel hell gesteuert sind, sodass eine weiße Fläche projiziert wird,
- *Dunkelbild* mit abgeschalteten Lichtquellen.

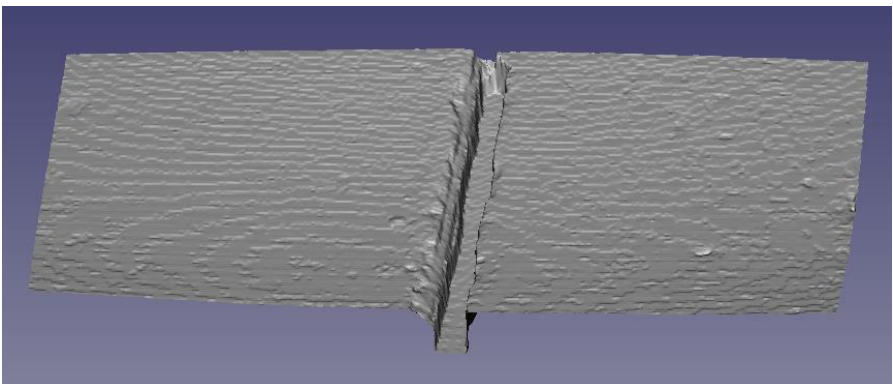


**Abb. 4.** Rohes Musterbild (links), rohes Hellbild (Mitte) und farboptimiertes Musterbild einer Testmessung

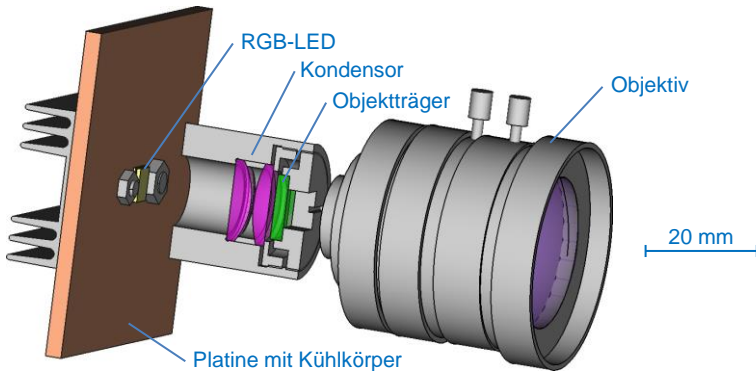
Momentan wird mit statischen Szenen gearbeitet, bei denen kein Versatz zwischen diesen Bildern auftritt.

#### 4 Ermittlung des 3D-Profiles

Für eine sichere Farbklassifikation der Symbole und Codeworte wäre der Einsatz einer 3-Chip-Farbkamera wünschenswert. Aus Kostengründen wird jedoch diese Lösung nicht weiter verfolgt, sondern nur eine Kamera mit Bayer-Filter in Betracht gezogen. Problematisch ist hierbei die geräteinterne Farbinterpolation, deren Wirkungsweise im Detail unbekannt ist. Entgegen diesen Befürchtungen konnten aber Haist u. a. [4] die Brauchbarkeit einer Einchip-Farbkamera zur Auswertung von Farbstreifenmustern an einer konkreten Anwendung zeigen. Trotz Abweichungen im Messverfahren sind wesentliche Ergebnisse übertragbar. Die Autoren erreichen einen beachtlich kleinen RMS-Messfehler der Streifenposition von 0,01 bis 0,07



**Abb. 5.** Interpolierte 3D-Daten der Testmessung einer Rohrrinnenwand



**Abb. 6.** Entwurf des Festmusterprojektors (Teilschnitt)

Pixeln sogar im komprimierten Endbild einer Consumer-Kamera.

Um die Fehlerquellen zu minimieren, verwenden wir sicherheitshalber nicht die kamerainternen Verarbeitungsschritte. Stattdessen wird auf das Rohbild zugegriffen und eine eigene, farbmusterangepasste Interpolation durchgeführt. Ein spezieller Aspekt dieses Vorgehens besteht darin, die grünen Farbwertanteile nur aus Nachbarpixeln in Streifenrichtung zu bestimmen. So wird senkrecht zur Streifenrichtung eine höhere Grün-Auflösung erreicht. Dies ist erforderlich, da der Grünkanal zur exakten Lokalisation der Streifen- bzw. Symbolmittelpunkte in jeder Bildzeile dient. Genau an diesen Orten sind die zum Symbol gehörenden Farbwertanteile R und B am zuverlässigsten bestimmbar.

Zum Ausgleich lokaler Beleuchtungs- und Remissionsunterschiede dienen Hell- und Dunkelbild der gleichen Objektszene. Abb. 4 zeigt Rohbilder und das interpolierte und helligkeitskorrigierte Farbmusterbild eines Testbeispiels. Nach dieser Optimierung ist eine Unterscheidung zwischen „Farbsignal vorhanden“ und „Farbsignal nicht vorhanden“ mit Hilfe eines festen Schwellwertes möglich. Mehr Zuverlässigkeit erreichen wir jedoch, indem wir die Symbole und Codeworte über einen Bayessches Ansatz ermitteln, welcher bereits an anderer Stelle [5] erläutert wurde.

Im letzten Verarbeitungsschritt wird für jedes erkannte Codewort aus dessen horizontaler Bildkoordinate die Disparität berechnet. In einem einfachen Rechenschritt ergibt sich hieraus ein Punkt der Messfläche. Abb. 5 zeigt die gesamte Punktwolke einer Testmessung in einem Rohr mit ca. 1 m Innendurchmesser.

## 5 Miniaturisierung

Für dünnere Rohre mit minimal 200 mm Innendurchmesser ist der vorgestellte Messaufbau ungeeignet, da der DLP-Projektor zu viel Platz beansprucht. Geringere Abmessungen erreicht man durch Einsatz eines Festmusterprojektors, bei dem die Komponenten zur dynamischen Mustergenerierung entfallen. In Abb. 6 ist das CAD-Modell des in den Versuchsaufbau integrierten Projektors dargestellt. Zur Bildaufnahme wurde eine Industrie-Kamera mit 2/3-Zoll-Farbsensor (CMOS) eingesetzt. Die wichtigsten Daten des Versuchsaufbaus lauten:

Lichtquelle:	4-Chip-LED (3 genutzt), ca. 3 x 10 A
Brennweite (Projektor und Kamera):	5 mm
Objekt- und Sensorgröße:	8,5 x 7,1 mm <sup>2</sup>
Objektstand:	100...150 mm
Rohrdurchmesser:	200...300 mm

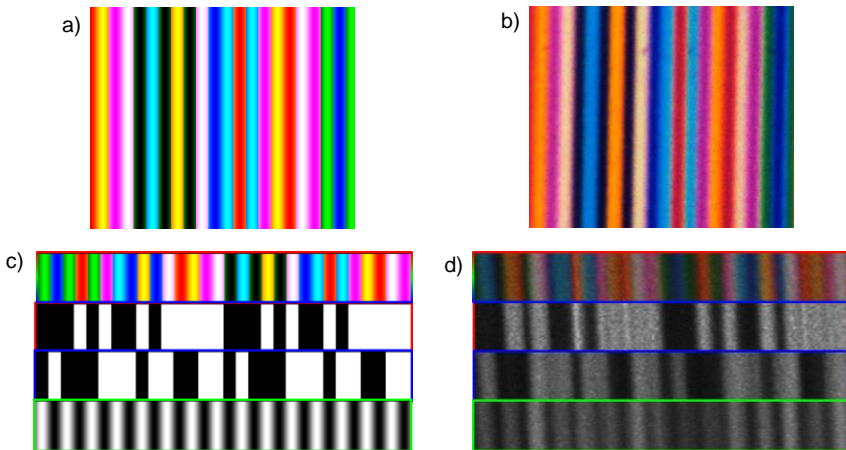
Das Messsystem wird so angeordnet, dass sich die Eintrittspupillen der Objektive auf der Rohrachse befinden. Dies ist eine notwendige Forderung für ein erweitertes System, das den gesamten Umfang der Rohrrinnenwand abbilden soll. Der kompakte Aufbau ist am einfachsten mit einer kleinflächigen polychromatischen Lichtquelle realisierbar, die das dreischichtige Farbmuster auf dem Objektträger beleuchtet. Die Farbanteile R, G und B der Symbole und Codeworte entstehen subtraktiv. Das Spektrum einer LED-Kombination mit nur drei schmalen Bändern erleichtert die Farbkanaltrennung gegenüber einer Lichtquelle mit kontinuierlichem Spektrum.

### Subtraktives Farbmuster

Als Technologien zur Herstellung des Farbmusters kommen in Betracht:

- Tintenstrahldruck auf Transparenzfolie,
- klassisches Farbdia (Agfacolor),
- farbiger Glasdruck,
- fotolithografische Verfahren.

Tintenstrahldruck und die meisten Anbieter für farbigen Glasdruck scheiden wegen zu geringer Auflösung oder wegen Farbrasterung (laterale Partialfilter im "Makropixel") für Mischfarben aus. Auch die wenigen Hersteller mit scheinbar geeigneter Technologie (UV-Druck bzw. Nanotintendruck) konnten nur unbefriedigende Testmuster liefern. Anfragen zu fotolithografischen Verfahren waren letztlich trotz Be-

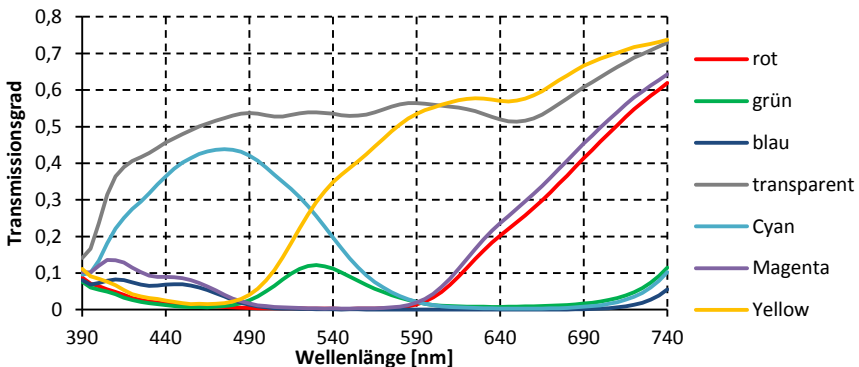


**Abb. 7.** Analyse eines Farbdias als Festmuster. Links Soll-, rechts Istzustand

mühen eines Herstellers ohne Ergebnis. Problematisch ist offenbar auch die Realisierung eines Farbmusters durch gestapelte Filterschichten. Die entsprechende Technologie für einen 7-fach-Fotoresist hätte Entwicklungskosten von mindestens 40000 € erfordert.

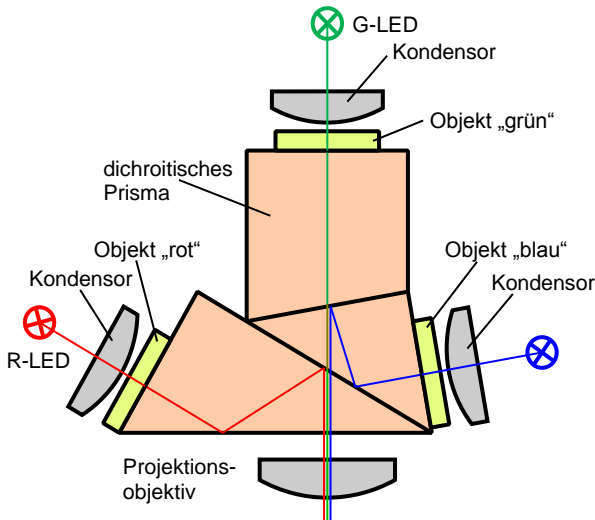
Als aussichtsreichste Technologie blieb das gewöhnliche Farbdia aus der Analogfotografie übrig. Da diese Technik als veraltet gilt, sind keine Anbieter zu finden, die Diapositive auf geeignetem Träger (z.B. Glassubstrat) nach Kundenvorlagen herstellen. Ein Hersteller bietet jedoch das Ausbelichten von Bilddateien auf Kleinbilddias (Filmträger) in verschiedenen Auflösungen an. Die höchste Auflösung beträgt 8192 x 5464 Pixel, das entspricht 2890 dpi bzw. einem Pixelabstand von 4,4 µm.

Nach unserer Vorlage wurde ein Dia gefertigt, das etwa das in Abb. 2 dargestellte Muster realisieren soll. Im Unterschied zu Abb. 2 wurde jedoch der Grünkanal mit einer sinusförmigen Intensitätsverteilung codiert, was die subpixelgenaue Lokalisierung der Streifen vereinfacht. Abb. 7 a) zeigt einen Ausschnitt der vorgegebenen Bilddatei und Abb. 7 b) einen gleich großen Ausschnitt des hergestellten Dias in einer mikroskopischen Durchlichtaufnahme. In Abb. 7c und 7d werden Soll- und Ist-Bild genauer analysiert. Links (c) ist ein Ausschnitt der Bildvorlage in Farbe und durch die Intensitäten im roten, blauen und grünen Farbkanal dargestellt. Zum Test wurde das Dia durch den oben beschriebenen Festmusterprojektor auf eine helle ebene Fläche abgebildet und mit der Messkamera aufgenommen. Das Ergebnis ist in Abb. 7 d) veranschaulicht: oben das Farbbild, darunter die Farbauszüge nach der beschriebenen Farbinterpolation.



**Abb. 8.** Spektraler Transmissionsgrad eines Vergleichsdias in den Grundfarben

Die Qualität des Dias erscheint unter dem Mikroskop genügend hoch für die vorgesehene Anwendung. Beim Einsatz im Projektor zeigt sich jedoch, dass die Farbwiedergabe und die Trennbarkeit der Farbkanäle unzureichend sind. Dies lässt sich anhand spektraler Untersuchungen nachvollziehen. Hierzu wurde ein weiteres Dia in der gleichen Technologie wie das Festmuster hergestellt, das an Stelle der Streifenstruktur größere homogene Felder in den Grundfarben enthält. Abb. 8 zeigt die gemessenen spektralen Transmissionen des Vergleichsdias in diesen Farbfeldern. Dabei fällt auf, dass die grüne und die blaue Komponente jeweils als Produkt zweier entsprechender CMY-Grundfarben vergleichsweise schwach ausgeprägt sind.



**Abb. 9.** Prinzip eines Festmusterprojektors mit additiver Farbmischung

Das führt zu Intensitätsschwankungen in den einzelnen Kanälen, die insbesondere im zur Streifenlokalisierung erforderlichen Grünkanal stark ausgeprägt sind (siehe Abb. 7 d unten). Kameraseitig lassen die Filterkurven der Bayermaske auch Anteile von LED-Spektren durch, die eigentlich zu blocken sind, was zu einem Übersprechen der blauen und roten Kanäle in den Grünkanal und umgekehrt führt. Dies kann durch eine verbesserte LED-Auswahl reduziert werden.

Theoretisch kann das Übersprechen der Farbkanäle auch durch ein multilineares Farbübertragungsmodell verringert werden [5], dessen Parameter aufwändig kalibriert werden müssen. Insgesamt waren sowohl die Qualität des Farbdias als auch die damit verbundene energetische Effizienz nicht geeignet, sodass dieser Ansatz für den hier beschriebenen Einsatzfall nicht weiter verfolgt werden konnte.

### Additive Kombination von Farbmustern

Als Alternative bietet sich an, das Festmuster additiv aus einer aktiven, roten, grünen und blauen Komponente mit maximalem Farbkontrast zusammenzusetzen. Diese Teilmuster müssen sich auf getrennten Objektträgern befinden und die projizierten Bilder sind optisch zur Deckung zu bringen. Der umgekehrte Prozess, also das Aufspalten eines Bildes in Farbanteile und deren Abbildung auf getrennte Sensoren, wird in Mehrchipkamas angewendet und ist seit Jahrzehnten Stand der Technik. Zur Aufspaltung eignet sich ein dichroitischer Prismensatz, an dessen Grenzflächen die Farbauszüge mit geringen Verlusten sauber getrennt werden.

Um einen Projektor nach diesem Prinzip aufzubauen, sind nur die Farbsensoren durch die Objektträger und entsprechende Beleuchtungssysteme auszutauschen. Mit einem Prisma des „Philips-Typs“ [6] ergibt sich prinzipiell ein Aufbau gemäß Abb. 9. Da die spektrale Selektion innerhalb des Prismas erfolgt, sind neben schmalbandigen R,G bzw. B-LEDs theoretisch auch breitbandige Lichtquellen einsetzbar. Aus energetischen Gründen sind die LEDs jedoch zu bevorzugen. Als

Objekte eignen sich fotolithografisch hergestellte Chrommasken, da diese mit ausreichend feinen Strukturen in hoher Qualität verfügbar sind.

Nachteilig sind die großen Lichtwege aufgrund der Prismengeometrie. Damit ist tendenziell nur ein Feldwinkel von  $20^\circ \dots 30^\circ$  auf der Seite des Prüfobjekts erreichbar, der sich eventuell mit speziell entwickelten Objektiven erhöhen lässt. Ideal wäre ein Objektiv, das auf der Seite des Prismensatzes telezentrisch, also „bildseitig telezentrisch“ im üblichen Sprachgebrauch ist. Um die Bilder der Farbauszüge auf der Prüffläche zur Deckung zu bringen, sind die Objektträger mikrometergenau zu positionieren. Günstig für die axiale Positionierung ist die in Abb. 9 gezeigte Prismenform, bei der der Glasweg in den drei Teilprismen gleich ist und die Objektträger direkt auf eine Prismenfläche gesetzt werden können. Wegen des Problems der langen Lichtwege ist diese Anordnung für die vorgesehene Anwendung voraussichtlich nicht geeignet.

## 6 Fazit

Ein Verfahren der aktiven Stereoskopie mittels Farbmusterkodierung wurde an einem praktischen Einsatzfall getestet. Im Laborversuch wurde das Farbmusterobjekt durch einen Projektor mit Mikrospiegel-Array (DLP) in voller HD-Auflösung realisiert. Damit konnte das gewünschte Muster in hoher Qualität und Intensität erzeugt werden und in Kombination mit einer 5-MP-Farbkamera ergab sich ein funktionstüchtiges Messsystem. Dieses System eignete sich aufgrund seiner Abmessungen nicht für den Einsatz in engen Rohren. Ungünstig war ferner der beträchtliche technische Overhead des Projektors.

Eine beträchtliche Reserve zur Miniaturisierung bestand also darin, einen wesentlich einfacheren, auf die Anwendung zugeschnittenen Projektor zu verwenden, der lediglich ein statisches Muster projiziert. Die Realisierung dieses Musters in Form einer Trägerschicht mit transparenter Struktur erschien zunächst durch verschiedene „Alltagstechnologien“ möglich. Alle praktischen Versuche dazu scheiterten jedoch wegen unpräziser Strukturierung oder Farbwiedergabe. Die wesentlichen Anteile der Arbeit sind im Rahmen des Verbundprojektes AUZUKA (FKZ 13N13895) durch das BMBF gefördert worden.

## Literatur

1. J. Salvi, J. Pagès und J. Batlle. „Pattern codification strategies in structured light systems“. In: *Pattern Recognition* 37 (2004), S. 827–849.
2. S. F. Navarro. „One-shot Pattern Projection for Dense and Accurate 3D Reconstruction in Structured Light“. Diss. Universität de Girona, 2012.
3. D. Modrow. „Echtzeitfähige aktive Stereoskopie für technische und biometrische Anwendungen“. Diss. Technische Universität München, 2008.
4. T. Haist und H. J. Tiziani. „Farbkodierte objektangepasste Streifenprojektion für die schnelle 2D- und 3D-Qualitätsprüfung“. In: *Technisches Messen* 69.9 (2002), S. 367–373.
5. R. Jahn, D. Kapusi, K.-H. Franke und R. Nestler. „Aktive Stereoskopie mittels Farbmusterkodierung“. In: *22. Workshop Farbbildverarbeitung* (2016), S. 183–196, ISBN: 978-3-00-053918-3.
6. H. Lang und B. Bouwhuis. „Optical system for a color television camera“, *Patentschrift* US3202039 (A), 1965.