

Untersuchung der Polarisierungstechnik für photogrammetrische Anwendungen

Niklas CONEN, Heidi HASTEDT, Oliver KAHMEN und Thomas LUHMANN

Zusammenfassung

Reflexionen auf einer Oberfläche können bei einer stereoskopischen Bildauswertung zu fehlerhaften Zuordnungen führen und das Messergebnis verfälschen. Zur Eliminierung von störenden Lichtreflexen oder Totalreflexionen sind Polarisationsfilter in der Optik ein sehr wirkungsvolles Mittel.

In diesem Beitrag wird untersucht, wie sich die Polarisierungstechnik auf photogrammetrische Prozeduren wie Kamerakalibrierung und Bildzuordnung auswirkt. Außerdem wird ein optisches Messsystem vorgestellt, das mithilfe der Polarisierungstechnik stark reflektierende Freiformflächen dreidimensional erfassen kann. Mit diesem Prototyp wird eine Schweineniere mit verschiedenen Reflexionsgraden untersucht. Die Genauigkeit sowie Vollständigkeit der resultierenden Punktwolke kann durch die Eliminierung störender Reflexionen erheblich verbessert werden. Weiterhin wird auf die Besonderheit metallischer Oberflächen eingegangen. Für eine konkrete Anwendung wird dargestellt, wie eine Laserlinie und Messmarken zeitgleich bei einem metallischen Objekt ohne Störeinflüsse segmentiert werden können.

1 Grundlagen

Im ersten Kapitel werden die Herausforderungen dargestellt, die störende Reflexionen bei einer Bildauswertung mit sich bringen. Zur Lösung des Problems werden grundlegende Eigenschaften von Licht und deren Reflexion an Oberflächen zunutze gemacht, die ebenfalls erläutert werden.

1.1 Problemstellung dichte Oberflächenerfassung

Das Ziel bei einer dichten Stereobildzuordnung ist es, für jedes Pixel im Ausgangsbild das zugehörige Pixel im Nachbarbild zu finden. Mit den korrespondierenden Bildpunkten sowie der inneren und äußeren Orientierung der beiden Kameras lassen sich 3D-Punkte mittels Vorwärtsschnitt berechnen. Dies führt zu einer dichten 3D-Punktwolke.

Das Finden korrespondierender Bildpunkte ist keine triviale Aufgabe, da die Grauwerte zweier Bilder aufgrund natürlicher und technischer Einflüsse nicht identisch sind. Die Existenz, Eindeutigkeit und Stabilität eines Ergebnisses kann daher vorab nicht unbedingt garantiert werden. Deshalb gehört die Bildzuordnung zu der Klasse der schlecht gestellten Probleme (BERTERO et al. 1988). Dennoch können durch verschiedene Annahmen und Vereinfachungen Lösungen angenähert werden. Beispielsweise werden nicht nur einzelne Pixel, sondern definierte Bereiche (z. B. 11×11 Pixel große Fenster) auf Ähnlichkeit geprüft. Zwei Bildpunkte sind sehr wahrscheinlich korrespondierend, wenn deren unmittelbare Umgebung eine ähnliche Grauwertverteilung aufweist. Voraussetzung hierfür ist eine hinreichend gute Objekttextur, die in beiden Bildern eindeutig zugeordnet werden kann.

Häufig bildet sich die erfasste Objekttextur durch äußere Parameter wie den Blickwinkel der Kameras, der Beleuchtung oder dem Objekt selbst sehr unterschiedlich ab. Beispielsweise werden Bereiche abgeschattet oder aus Sicht der jeweiligen Kamera unterschiedlich beleuchtet. Letzteres stellt gerade bei stark reflektierenden oder gar spiegelnden Oberflächen ein Problem dar. Reflexionen auf einem Objekt variieren je nach Ausrichtung der Kamera und Lichtquelle und verursachen scheinbar unterschiedliche Objekttexturen in gleichen Bereichen (vgl. Abb. 1).

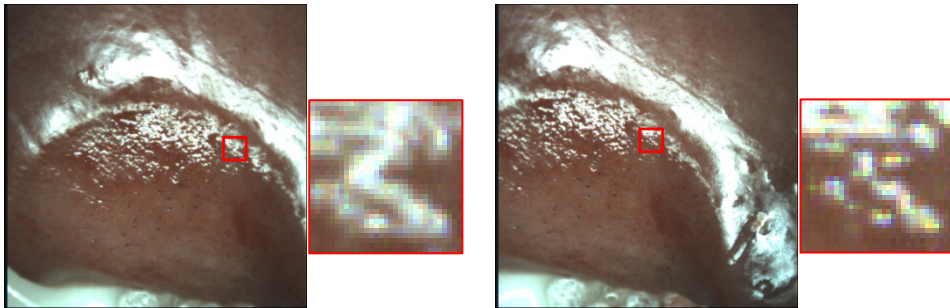


Abb. 1: Orientiertes Stereobildpaar einer befeuchteten Schweineniere; Reflexionen im linken und rechten Bild sind stark unterschiedlich in gleichen Bereichen

Durch diverse Kontroll- (Rechts-Links-Check) und Glättungsverfahren (SGM, Medianfilter) können derartige Fehlzuordnungen teilweise behandelt werden. Zudem können sequenzielle Aufnahmen, bei denen die Reflexionen variieren, eine höhere Robustheit bringen. Bei nicht statischen Objekten mit sehr vielen Reflexionen sind diese Verfahren jedoch limitiert. In diesen Fällen ist es sinnvoll, mittels kontrollierter Beleuchtung und Filtertechnik besseres Bildmaterial zu erzeugen, anstatt die störungsbehafteten Bilder hinzunehmen und lediglich algorithmisch zu behandeln (z. B. überstrahlte Pixel überspringen).

1.2 Licht und Wechselwirkung mit Objekten

Zur Erläuterung der Polarisations- und Beleuchtungstechnik werden im Folgenden wichtige Grundlagen zur Lichtausbreitung und Wechselwirkung mit Objekten dargestellt.

Unter Betrachtung der Wellencharakteristik breitet sich Licht entlang eines Raumstrahls (Ausbreitungsrichtung, z-Achse) als transversale elektromagnetische Welle aus (Abb. 2a). Die Wellenlänge definiert die Farbe und die Amplitude kann als Intensität bzw. Helligkeit aufgefasst werden. Die räumliche Ausbreitung der Schwingung ist senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (z-Achse) und kann um diese rotieren. Die Schwingungsrichtung (Abb. 2, magentafarbene Feldvektoren) wird als Polarisation bezeichnet. Im Gegensatz zur Wellenlänge und Amplitude ist die Polarisationsrichtung für den Menschen nicht sichtbar. Eine Welle ist linear polarisiert, wenn deren Schwingungsausbreitung in einer Raumebene liegt (Abb. 2a). Bei einer elliptischen oder zirkulären Polarisation dreht sich der Feldvektor kontinuierlich um die Ausbreitungsrichtung (Abb. 2b).

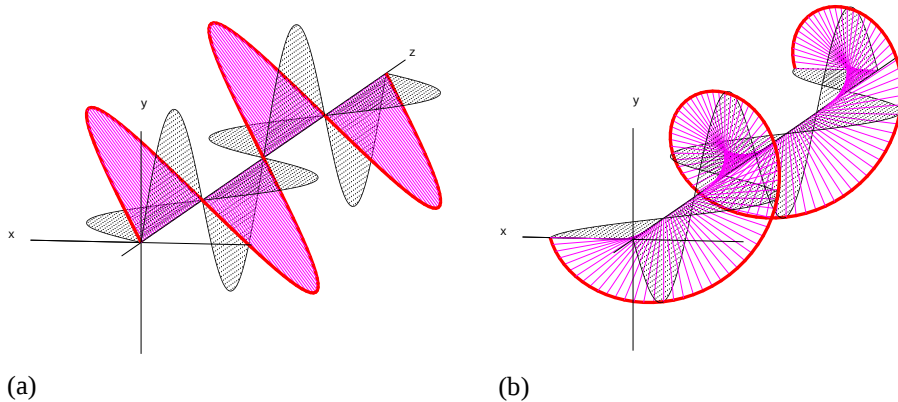


Abb. 2: Licht als Transversalwelle mit linearer (a) und zirkulärer (b) Polarisation

Nahezu alle Lichtquellen senden unpolarisiertes Licht aus; die Schwingungsrichtung ist zunächst also willkürlich. Trifft das Licht auf ein nichtmetallisches Objekt (Dielektrikum), kann durch Reflexion, Streuung oder Brechung eine (Teil-)Polarisation entstehen. Entspricht der Einfallswinkel dem sogenannten Brewster-Winkel, entsteht eine vollständige Polarisation senkrecht zur Einfallsebene. Das Verhalten bei metallischen Oberflächen wird in Kapitel 4.2 erläutert.

Trifft bereits polarisiertes Licht auf ein Objekt, hängt die Polarisation eines reflektierten Lichtstrahls nur noch von der Art der Reflexion ab. Diese kann, abhängig von der Rauigkeit des Objektes, gerichtet oder diffus sein. Ist die Rauigkeit kleiner als die Wellenlänge des einfallenden Lichtstrahls, ist die Reflexion gerichtet, andernfalls diffus. Bei einer gerichteten Reflexion, sprich Spiegelung, bleibt die Polarisationsrichtung der Lichtquelle erhalten. Bei einer diffusen Reflexion hingegen geht die Polarisationsrichtung verloren.

Weitere Grundlagen bezüglich Licht, Polarisation und Filter können BEYERER et al. (2012) und JÄHNE (2012) entnommen werden.

1.3 Polarisationsfilter

Optische Filter werden i. d. R. vor dem Objektiv angebracht und beeinflussen das einfallende Licht auf unterschiedliche Art und Weise. Während Graufilter die gesamte Intensität oder Hoch-, Tief- und Bandpassfilter die Transmission bestimmter Wellenlängen beeinflussen, sperren Polarisationsfilter (kurz Polfilter) Lichtwellen mit einer definierten Schwingungsrichtung aus. So können mit Polfilter bestimmte Reflexionen, wie z. B. die polarisierte Spiegelung der Sonne auf einem See, in der Abbildung des Kamerasystems vermindert werden.

Ergänzend können Reflexionen besser kontrolliert werden, wenn die verwendete Lichtquelle ebenfalls polarisiert wird. Dies kann mithilfe einer Polfilterfolie erreicht werden. Wird ein polarisierter Lichtstrahl totalreflektiert und direkt in das Objektiv zurückgeworfen, kann diese Reflexion durch einen um 90° zur Polarisationsrichtung der Beleuchtung gedrehten Polfilter eliminiert werden. Diese Konfiguration zweier gekreuzter Polfilter wird in der Abbildung 3 skizziert.

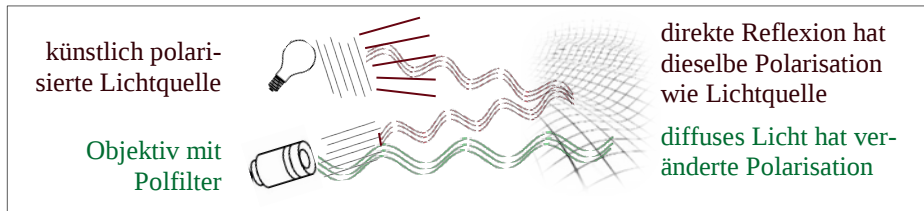


Abb. 3: Skizze zur Funktionsweise der Kreuzpolarisation

Ein derartiges Aufnahmesystem ist in der Lage, direkte Reflexionen auf nahezu allen Oberflächen oder durch Flüssigkeiten zuverlässig zu eliminieren – unabhängig von Materialeigenschaften und der Aufnahmeposition. Abbildung 4 veranschaulicht die Wirkung der Kreuzpolarisation anhand eines Experiments mit einem stark reflektierenden Mousepad. Ohne Polfilter (a) ist die Reflexion der Lichtquelle deutlich sichtbar. Bei paralleler Ausrichtung (b) wird die gesamte Intensität verringert, die Reflexion bleibt jedoch erhalten. Bei gekreuzter Anordnung der Polfilter (c) wird die direkte Reflexion der Lichtquelle vollständig ausgelöscht, wohingegen die diffusen Reflexionen den Polfilter passieren können. Die Ausleuchtung des Bildes ist wesentlich homogener. Polfilter führen zu einer höheren Farbsättigung des entstehenden Bildes, erfordern jedoch längere Belichtungszeiten.

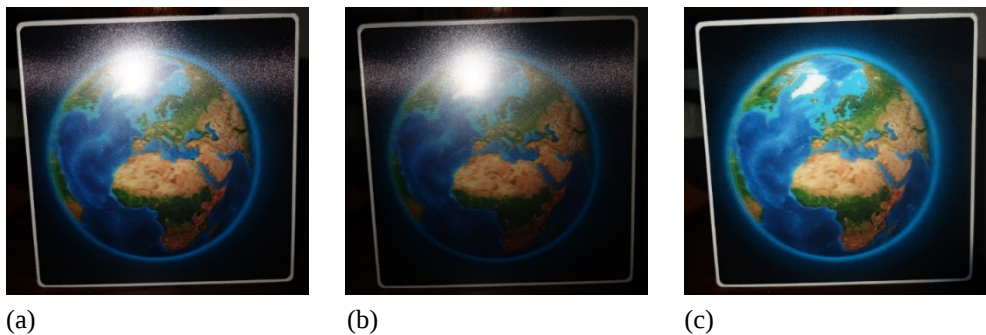


Abb. 4: Experiment mit polarisierter Lichtquelle und Aufnahmesystem. Polfilter sind (a) nicht vorhanden, (b) parallel ausgerichtet, (c) gekreuzt ausgerichtet.

2 Motivation

Polfilter oder die speziellere Kreuzpol-Blitztechnik werden in der Fotografie (insbesondere in der Filmbranche und der professionellen Werbefotographie) eingesetzt, um beispielsweise sattere Farben zu erzeugen oder bestimmte Reflexionen zu verringern (BAUMBACH 2014, BEITINGER 2016).

In der Industrie kommen Polfilter beispielsweise in der Spannungsmesstechnik zum Einsatz. Durch Doppelbrechung eines transparenten Materials können mithilfe gekreuzter Polfilter Spannungen im Material als Farbmuster sichtbar gemacht werden (BEYERER et al. 2012).

Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) entwickelte die Polarisationskamera POLKA, welche ein Mikrolinsenarray besitzt, deren einzelne Linsen – ähnlich wie ein Bayer-Pattern – in vier verschiedene Richtungen polarisiert sind. Dies ermöglicht beispielsweise die Analyse der Faserrichtung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen mit einer einzelnen Aufnahme (FRAUNHOFER 2018).

Durch die Aufnahme einer Szene mit verschiedenen Polarisationszuständen kann die betrachtete Oberfläche mittels Shape-from-Polarisation (ATKINSON 2006) dreidimensional rekonstruiert werden. HERRERA et al. (2013) setzten dieses Verfahren mit einem polarisierten Endoskop für die Laparoskopie ein. Bei Versuchen mit verschiedenen Organen konnten bessere Ergebnisse als durch Shape-from-Shading erzielt werden.

Eine weitere Anwendung für Polfilter in der Endoskopie wird von CLANCY et al. (2014) dargestellt. Durch simultane Aufnahme zweier gekreuzter Polarisationsrichtungen und Segmentierung der Farbkanäle durch einen dreifachen Bandpassfilter können kontrasterweiterte Bilder erzeugt werden, in denen sehr dicht angeordnete und kleine Blutgefäße sichtbar werden. Dies bietet neue Möglichkeiten in der endoskopischen Diagnostik.

Ausgehend von diesen Fortschritten in der Bildinterpretation für medizinische Aufgaben soll die Polarisationstechnik für die 3D-Rekonstruktion von Freiformoberflächen untersucht werden. Der Einsatz eines trinokularen Endoskops unter Berücksichtigung spezieller Rekonstruktionsalgorithmen bildet dabei die Grundlage zur 3D-Rekonstruktion von Oberflächen in der medizinischen Versorgung. Die beschriebenen Grundlagen und Voruntersuchungen zur Minimierung der für die Erfassung störenden Reflexionen sind vielversprechend für die Verbesserung der Rekonstruktion. Es ergibt sich daraus die Fragestellung, inwiefern sich der Einsatz von Polarisationstechnik einerseits auf die Anwendbarkeit der funktionalen Modelle und damit auf die Messgenauigkeit auswirkt und andererseits die 3D-Rekonstruktion beeinflusst. Neben einer grundsätzlichen standardisierten Genauigkeitsuntersuchung werden Versuche für medizinische und industrielle Aufgaben vorgestellt.

3 Messtechnischer Einfluss eines Polarisationsfilters

Aus messtechnischer Sicht stellt sich die Frage, ob und wie Polfilter die Parameter der inneren Orientierung beeinflussen und inwiefern die Messgenauigkeit beeinträchtigt wird.

Im nachfolgenden wird eine Untersuchung vorgestellt, in der mit fünf verschiedenen Kamerasetups (A-E) je drei Bildverbände (Test 1-3) mit (/pol) und ohne Polfilter von einem Testkörper aufgenommen wurden. Es wurden zwei Spiegelreflexkameras mit demselben 24-mm-Nikkor-Objektiv verwendet. Die Kamerasetups sind:

- A Nikon D2X mit einem exzentrischen Blitzlicht,
- B Nikon D4 mit einem exzentrischen Blitzlicht,
- C Nikon D2X mit einem Ringlicht befestigt am Objektiv,
- D Nikon D4 mit einem Ringlicht befestigt am Objektiv und
- E Nikon D2X mit einem Ringlicht befestigt am Kamerakörper.

Setup E wurde aus Stabilitätsgründen eingeführt, da das Ringlicht von Setup C und D die innere Geometrie des Kamerasystems aufgrund des zusätzlichen Gewichtes beeinträchtigen könnte. Abbildung 5 zeigt diese Setups exemplarisch.

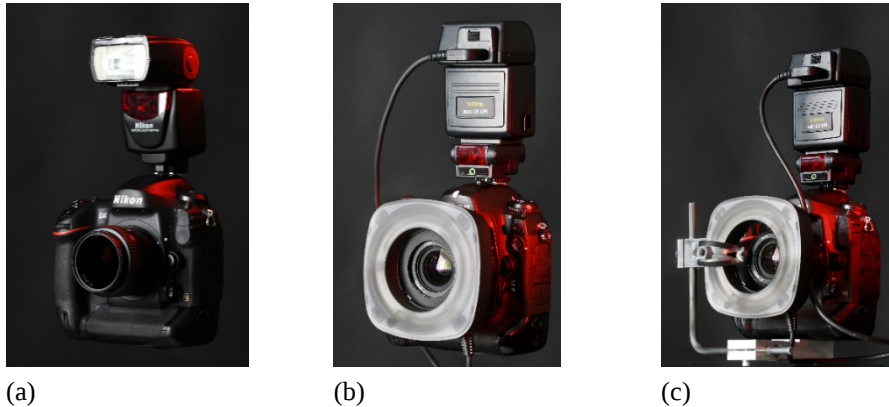


Abb. 5: Exemplarische Kamerateups: (a) Nikon D4 mit exzentrischem Blitzlicht und Pol-filter (A), (b) Nikon D2X mit Ringlicht befestigt am Objektiv (C), (c) Nikon D4 mit Ringlicht befestigt am Kamerakörper (E)

Die Aufnahmeconfiguration und das Testfeld (Abb. 6) entsprechen der deutschen Richtlinie VDI/VDE 2634 Blatt 1 für bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung. Entsprechend bestehen die Bildverbände aus zwölf Positionen mit je drei unterschiedlichen Höhen und je vier verschiedenen Kantungen der Kamera. Dies führt zu 144 Bilder je Bündel. Das Testfeld bzw. der VDI-Prüfkörper hat eine Ausdehnung von etwa $2 \times 2 \times 1,5 \text{ m}^3$ und verfügt über sieben Messlinien, die insgesamt 58 Prüflängen aufspannen. Die Prüflängen sind mit einer Genauigkeit von $< 10 \text{ }\mu\text{m}$ kalibriert. Zur Maßstabsfestlegung werden drei Maßstäbe mit demselben Genauigkeitsniveau entlang der drei Koordinatenrichtungen eingeführt. Über die Prüflängen werden Längenmessabweichungen als Ist-Soll-Vergleich bestimmt. Die maximale absolute Längenmessabweichung LME_{max} dient als Maß für die absolute Genauigkeit des Systems in der Versuchsreihe.

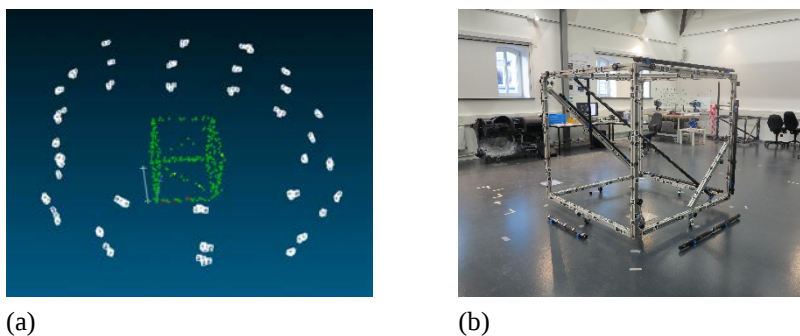


Abb. 6: Aufnahmeconfiguration (a) um den VDI-Prüfkörper (b)

Die jeweiligen Bildverbände werden in einer Bündelausgleichung ausgewertet, wobei die innere Orientierung simultan mitbestimmt wird. Die resultierenden RMS der Objektpunkte liegen für alle Tests im Bereich von $20 \text{ }\mu\text{m}$ in der x-, y- und z-Komponente, was dem Qualitätsniveau der eingesetzten Kameras entspricht. Die mittleren Bildmessgenauigkeiten liegen im

Bereich von 1/17 Pixel. Bei diesen Versuchen konnten keine signifikanten Veränderungen der inneren Orientierung bei Verwendung eines Polfilters festgestellt werden. Zwar tendieren die Ergebnisse zu einer 3 -5 μm längeren Kamerakonstante mit Polfilter, was aufgrund der zusätzlichen Glas-Trennschicht vor dem Objektiv plausibel wäre, jedoch kann dies aufgrund der ermittelten Messunsicherheit nicht signifikant nachgewiesen werden. Die maximalen absoluten Längenmessabweichungen werden in Tabelle 1 und Abbildung 7 aufgeführt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der $\text{LME}_{\max}$ der Kamerasetups und Tests

Setup/Polfilter	$\text{LME}_{\max}$ [mm]		
	Test 1	Test 2	Test 3
A/pol	0.075	0.110	0.158
A	0.086	0.134	0.110
B/pol	0.117	0.069	0.134
B	0.101	0.087	0.132
C/pol	0.223	0.227	0.121
C	0.157	0.183	0.135
D/pol	0.135	0.124	0.198
D	0.219	0.174	0.205
E/pol	0.060	0.091	0.098
E	0.070	0.071	0.077

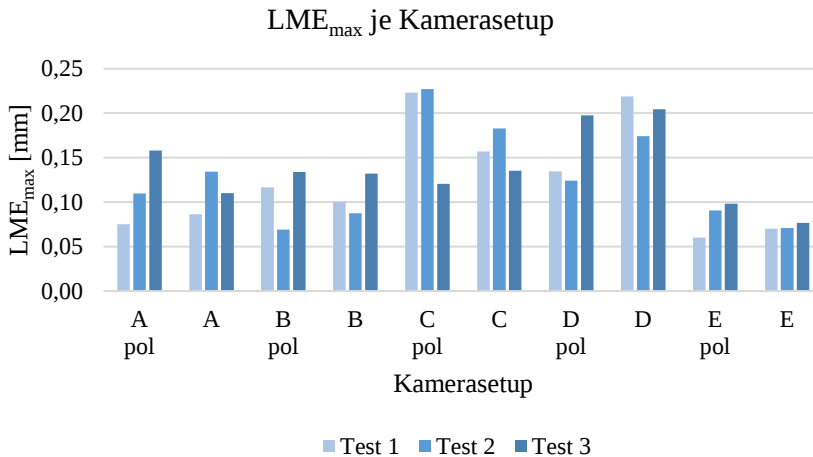


Abb. 7: Zusammenfassung der $\text{LME}_{\max}$ der Kamerasetups und Tests

Das Diagramm deckt drei Gruppen mit ähnlichen $\text{LME}_{\max}$ auf, die der Setups A-B, C-D und E. Außerhalb dieser Gruppen sind jedoch stärkere Abweichungen zu erkennen. Diese sind dem Einsatz verschiedener Blitzeinrichtungen zuzuschreiben.

Die Schwerkraft des am Objektiv befestigten Ringlichtes (Gruppe C-D) beeinflusst die innere Geometrie bei Kantung der Kamera. Deshalb kann die Annahme einer konstanten inneren Orientierung während der Aufnahme nicht hinreichend gewährleistet werden, was letztlich zu einer größeren Längenmessabweichung führt. Der $LME_{\max}$ der Gruppen A-B und E sind kleiner, da die Beleuchtung vom Objektiv entkoppelt ist. Trotzdem liefert die Gruppe E geringfügig bessere Ergebnisse als die Gruppe A-B, da der exzentrische Blitz vermutlich zu einer minimal exzentrischen Bildmessung der retroreflektierenden Messmarken führt. Eine Signifikanz ist aufgrund der geringen Unterschiede jedoch nicht gegeben. Die Genauigkeit des Gesamtsystems wird durch die Unterschiede zwischen den drei Tests repräsentiert.

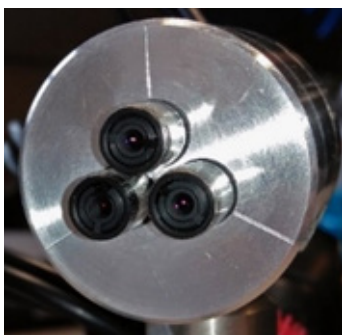
Bei Betrachtung der Versuche mit und ohne Polfilter fallen keine signifikanten Unterschiede der $LME_{\max}$ auf. Der Polfilter hat für diese Versuche demnach keinen bzw. einen nicht aufdeckbaren Einfluss auf die absolute Messgenauigkeit. Daraus kann gefolgert werden, dass das verwendete photogrammetrische Kameramodell (BROWN 1971, LUHMANN 2018) auch für Systeme mit Polfilter eingesetzt werden kann und im Bündel kein negativer Einfluss auf die Messgenauigkeit zu erwarten ist.

4 Oberflächenerfassung mit Polarisationsfilter

Aufgrund der Voruntersuchungen aus Kapitel 3 wird angenommen, dass auch andere Kamerasysteme mit Polfilter und ähnlichen Abbildungseigenschaften durch das übliche photogrammetrische Kameramodell beschrieben werden können. Im Folgenden werden zwei konkrete Anwendungen dargestellt, die sehr stark von der Polarisierungstechnik profitieren.

4.1 Endoskopische Erfassung von Organen

Das in CONEN et al. (2016) vorgestellte miniaturisierte Dreikamerasystem (Abb. 8a) wurde mit einer polarisierten Ringbeleuchtung und einem gemeinsamen Filter vor den Objektiven ausgestattet (Abb. 8b).



(a)



(b)

Abb. 8: Trinokulares miniaturisiertes Kamerasystem (a) und Aufsatz für polarisierte Beleuchtung und Filter (b). Die Polarisationsrichtungen werden durch rote und blaue Linien gekennzeichnet (in diesem Fall gekreuzt).