



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Die Dokumentation und Auswertung von hochdynamischen Prozessen mit Hilfe von High-speedkameras gehört in der Fahrzeugsicherheit der Automobilhersteller seit Jahren zum täglichen Geschäft. Moderne Kameras leisten Aufnahmefrequenzen von über 1000 Hz, die es ermöglichen, die schnellen und komplexen Bewegungen in einem Crashtest aufzuzeichnen und mit Methoden der Bildverarbeitung und Photogrammetrie auszuwerten. Die Analyse der Bildsequenzen und die Untersuchung des abgerüsteten Fahrzeugs geben Aufschluss über dessen Zustand und das Verhalten verschiedener Bauteile während eines Crashes. Diese photogrammetrischen Daten und Bildsequenzen werden zum Abgleich mit vorher virtuell durchgeführten Crashtests verwendet (RAGUSE ET AL. 2005) und sind damit ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung von Fahrzeugen.

Diese Highspeedkameras werden zum Aufzeichnen des Crashvorgangs von außen als so genannte stationäre (offboard) Kameras, aber auch zum Überwachen des Innenraums als mitfahrende (onboard) Kameras genutzt. Während die photogrammetrische Auswertung von offboard Bildsequenzen bereits eine etablierte Methode zur präzisen Messung von Fahrzeugbewegungen darstellt, ist diese Anwendung für onboard erzeugte Bildsequenzen noch neu. Der Hauptgrund, weshalb die photogrammetrische Messung bei mitfahrenden Systemen bisher kaum eingesetzt wird, sind die Deformationen und Bewegungen, denen zu beobachtende Objekte und Aufnahmesysteme in einem Crashtest unterliegen. Durch diese ständigen Veränderungen sind keine stabilen Verhältnisse im Aufnahmesystem (innere Orientierung) zu garantieren und kaum Möglichkeiten vorhanden, das Aufnahmesystem im Objektraum zu referenzieren (äußere Orientierung). Zusätzlich erschweren beengte Platzverhältnisse die präzise Messung von Trajektorien.

In dieser Arbeit wird ein neues Verfahren beschrieben, um das Potential und die Möglichkeit von mitfahrenden Kameras zu nutzen. Diese geben Einblick in Bereiche des Fahrzeugs, die von außen nicht einsehbar sind. Deformationen des Motorraums oder die bei einem Seitencrash entstehenden Verformungen des Türinnenraums lassen sich nicht von außen beobachten oder nach dem Crash beim Abrüsten des Fahrzeugs analysieren, denn es fehlen entscheidende Informationen über den Entstehungsprozess und den Deformationsvorgang



## 1 Einleitung

selbst. Diese Details können jedoch maßgeblich sein, wenn es darum geht, Maßnahmen zu definieren, um das Deformationsverhalten von Bauteilen zu verändern. Könnten diese Vorgänge auch quantitativ erfasst werden, bspw. durch das Messen von Abständen im Fußraum, um so den verbleibenden Bauraum für die Insassen zu erfassen, wäre das ein entscheidender Entwicklungsbeitrag. Diese Informationen können für virtuelle Insassenschutzmodelle genutzt werden, deren Prognosegüte dadurch deutlich verbessert werden würde.

Obwohl mitfahrende Kameras immer kleiner werden, können sie aufgrund technischer Notwendigkeiten, wie stabiler, crashfester Körper, Belüftung und Aufzeichnungseinheit, eine gewisse Mindestgröße kaum unterschreiten. Durch ihre Größe, Form und Befestigungsmöglichkeiten sind sie damit nicht in allen Fahrzeugbereichen einsetzbar.

Auf Grund dieser Gegebenheiten werden im Rahmen der vorliegenden Dissertation Möglichkeiten untersucht, Glasfaserendoskope während eines Crashtests zur Bildaufzeichnung und Bildanalyse einzusetzen. Aufgrund des geringen Durchmessers und des flexiblen Schlauches lassen sich Endoskope an schwer zugängliche Stellen bringen und sind auch in engen Hohlräumen einsetzbar. Im Endoskop integrierte Lichtleiter sorgen dafür, dass der zu beobachtende Bereich ausreichend beleuchtet werden kann. Sie bieten damit einen entscheidenden Vorteil gegenüber herkömmlichen Kameras und Objektiven. Der Einsatz von flexiblen Glasfaserendoskopen unter solchen hochdynamischen Bedingungen ist neu. Die Schaffung eines Stereomesssystems, das geeignet ist, präzise photogrammetrische Messungen im Fahrzeug während eines Crashes durchzuführen und das die Vorteile der flexiblen Faserbildleiter mitbringt, erschließt für die Analyse von Crashversuchen völlig neue Möglichkeiten.

Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe von Glasfaserendoskopen, die vorrangig zur statischen Betrachtung von Objekten genutzt werden, ein Stereomesssystem zur Analyse von hochdynamischen Prozessen im Bereich der Fahrzeugsicherheit zu entwickeln. Dieses Messsystem soll mitfahrend im Crashfahrzeug, und damit unter erschwerten Umgebungsbedingungen, das präzise Messen von dreidimensionalen Bewegungsvorgängen ermöglichen. Im Rahmen der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen soll das Genauigkeitspotential dieses neuen Messsystems ermittelt werden sowie ggf. notwendige Verbesserungen für den Einsatz der Endoskope aufgezeigt werden. Dabei werden die besonderen Eigenschaften von Faserbildleitern berücksichtigt. Für die durchzuführenden Messungen liegt der Fokus vor allem auf Relativbewegungen von Fahrzeug und Fahrzeugteilen. Das Messsystem muss ein Messvolumen von  $10 \cdot 10 \cdot 10 \text{ m}^3$  bis  $50 \cdot 50 \cdot 50 \text{ m}^3$  abdecken. Als Maß für die zu erreichende innere Genauigkeit wird eine maximale Abweichung der berechneten 3D-Relativbewegung (Distanz) von 5 mm angestrebt. Eine Vorgabe, die an die zu beobachtenden Objekte gestellt wird, ist, dass sich diese durch Punktmarken signalisieren lassen. Die Untersuchungen betrachten die Abbildungseigenschaften der Endoskope. In dynamischen Versuchen werden Stabilität und Messgenauigkeit des Stereomesssystems geprüft sowie Möglichkeiten zur Steigerung der Messgenauigkeit untersucht.



## 1.2 Gliederung der Arbeit

Um die durchgeführten Analysen und Ergebnisse zu beschreiben, ist die vorliegende Arbeit in sechs Kapitel gegliedert.

Im Anschluss an das vorliegende Kapitel werden in einem zweiten Kapitel die Anforderungen das neue Messverfahren definiert. Hierbei wird zwischen dem eigentlichen Messsystem und den Anforderungen an die Auswertung unterschieden. Im Anschluss werden die Grundlagen zu den Bereichen Endoskopie, Kamera und geometrische Kalibrierung zusammengefasst und bilden damit die fachliche Basis für die durchgeführten Untersuchungen und die daraus ermittelten Erkenntnisse. Ein Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik beschreibt Forschungs- und Einsatzbereiche der Endoskopie in Medizin und Technik sowie Verfahren zur Optimierung der Bildqualität von Endoskopaufnahmen. Eine Zusammenfassung und Bewertung der einschlägigen Literatur setzt die eigenen durchgeführten Untersuchungen in einen wissenschaftlichen Kontext.

Kapitel drei beschreibt zu Beginn, wie die Anforderungen an das Messsystem und die Auswertung realisiert werden sollen. Danach werden die einzelnen Komponenten erläutert, aus denen sich das für die Untersuchungen entwickelte Messsystem zusammensetzt. Dies umfasst die Kameras und die beiden Endoskope. Eine Genauigkeitsabschätzung prüft den geplanten Versuchsaufbau und vermittelt erste Eindrücke der zu erreichenden Genauigkeit.

In Kapitel vier werden die Konzepte und Ziele der durchgeführten Untersuchungen und Versuchsaufbauten beschrieben. Zuerst werden die Abbildungseigenschaften der Endoskope untersucht. In einer zweiten Stufe werden die Endoskope als Stereomesssystem in dynamischen Versuchen eingesetzt. Dabei liegt der Fokus auf der Stabilität der inneren Orientierung der Aufnahmesysteme und der erreichbaren Genauigkeit.

In Kapitel fünf werden die auf dieser Grundlage ermittelten Ergebnisse, erste Verbesserungspotentiale und eine Lösungsmöglichkeit vorgestellt. Die Bewertung der Ergebnisse und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen folgen in Kapitel sechs.

Eine abschließende Zusammenfassung der durchgeführten Experimente und der daraus gewonnenen Erkenntnisse werden im sechsten Kapitel beschrieben. Ein Ausblick zeigt weitere Untersuchungs- und Optimierungsbedarfe auf.





# 2 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Zuge dieser Arbeit soll ein Messsystem entwickelt werden, das es ermöglicht, Relativbewegung im Fahrzeug während eines Crashes mit einer vorgegebenen Mindestgenauigkeit zu messen. Im folgenden Kapitel werden dazu die Anforderungen beschrieben, die an das neue Messsystem und die Auswertung gestellt werden.

Vor diesem Hintergrund werden anschließend bestehende Messverfahren, Systeme und Anwendungen der Endoskopie vorgestellt. Hierbei wird auf die Unterschiede von flexiblen und starren Endoskopen und auf die Besonderheiten sogenannter Highspeedkameras eingegangen. Außerdem werden die verschiedenen im Gebiet der Computer Vision und Photogrammetrie vorhandenen Berechnungsverfahren zur Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung von Objektiven und das für diese Arbeit gewählte Verfahren vorgestellt. Weiterhin wird ein Überblick über die bisher vorhandenen Forschungen und Anwendungen im Bereich der medizinischen und technischen Endoskopie gegeben und auf die Aspekte der Bildoptimierung und Kalibrierung bei Endoskopen eingegangen.

Zuletzt werden die verfügbaren Verfahren im Hinblick auf die vorliegenden Anforderungen bewertet.

## 2.1 Anforderungen an ein neues System

### 2.1.1 Anforderungen an das Messsystem

Das neu zu entwickelnde Messsystem muss in der Lage sein, relative, dreidimensionale Bewegungen während eines Crashversuchs als onboard Stereomesssystem mit einer Präzision von unter 5 mm zu bestimmen. Dabei muss es ein Messvolumen von  $10 \cdot 10 \cdot 10 \text{ m}^3$  bis  $50 \cdot 50 \cdot 50 \text{ m}^3$  abdecken können, um verschiedene Anwendungsbereiche im Fahrzeug zu erschließen. Mit diesem Messvolumen ist es sowohl geeignet, in engen Fahrzeugbereichen, relativ nah am zu beobachtenden Objekt, angebracht zu werden, eignet sich jedoch auch für großvolumige Bereiche wie den Fußraum. Um diese Flexibilität zu ermöglichen, bedarf es einer kompakten und platzsparenden Bauform des Messsystems. Die Abmessungen des



Gesamtaufbaus der beiden starr befestigten Endoskopspitzen sollen nicht höher 3 cm und nicht breiter als 10 cm sein, um den Messkopf auch im Türinnenraum oder Motorraum platzieren zu können. Bei solchen Anwendungen stehen für den Verbau von Kameras nur wenige Zentimeter zur Verfügung, wofür herkömmliche Highspeed onboard Kameras zu groß sind. Bei der zulässigen Breite muss der Mindestabstand beachtet werden, den die beiden Endoskope haben müssen, um eine ausreichend große Basis für die geforderte Genauigkeit der Stereoauswertung zu haben. Ebenso wichtig für eine präzise Messung in Stereobildern ist, dass die Bildpaare absolut synchron aufgenommen werden.

Üblicherweise werden die Bildaufnahmen von Sicherheitsversuchen mit einer Bildfrequenz von 1000 Bildern/s erstellt. Diese Frequenz ist notwendig, um die schnellen Bewegungsvorgänge eines Crash zu erfassen und die Bewegungsunschärfe möglichst gering zu halten. Um diesen Anspruch zu erfüllen, muss auch das Messsystem in der Lage sein, Bildfrequenzen von mindestens 1000 Bildern/s aufnehmen zu können.

Da das Messsystem im operativen Betrieb im Prüffeld der Fahrzeugsicherheit einsetzbar sein soll, werden auch hierfür Anforderungen an das Messsystem gestellt. Dabei geht es zum Beispiel um Befestigungsmöglichkeiten des Messsystems im Fahrzeug, vor allem aber um bereits im Prüffeld vorhandene Technologien wie Beleuchtung und Kameras. Diese sollten nach Möglichkeit genutzt werden, um Zusatzaufwände bei Beschaffung und Anwendung im Tagesgeschäft zu vermeiden.

### 2.1.2 Anforderungen an die Auswertung

Die photogrammetrische Auswertung der Stereo-Aufnahmen muss es ermöglichen, aus den in den beiden Endoskop-Aufnahmen gemessenen Bildpunkten die 3D-Objektkoordinaten zu bestimmen. Daraus können anschließend die Relativbewegungen der gemessenen Punkte berechnet werden. Für die Bestimmung präziser 3D-Bewegungen ist die Kenntnis der inneren und äußeren Orientierung des Messsystems wichtig.

Um Abbildungseigenschaften des Messsystems bestimmen zu können, muss die zur geometrischen Kalibrierung notwendige Berechnungsmethode in der Software implementiert und geeignet sein, die Abbildungsgeometrie des neuen Messsystems hinreichend genau zu beschreiben. Gleichzeitig muss die Auswertesoftware, mit der später die Messungen vorgenommen werden, in der Lage sein, die Parameter der inneren Orientierung der Aufnahmesysteme rechnerisch bei den Messungen zu berücksichtigen.

In der Regel wird es nicht möglich sein, im beobachteten Objektbereich ein stabiles Passpunktfeld für die Berechnung der äußeren Orientierung einzurichten. Daher muss eine Methode gefunden werden, die relative Orientierung der beiden Endoskopspitzen zueinander zu bestimmen und konstant zu halten. Solche Methoden und auch entsprechende Auswertungen sind in bestehenden offboard Messsystemen verschiedener Anbieter bereits realisiert.



In diesem Anwendungsbereich ist deren Einsatz jedoch nicht praktikabel. Wie bereits bei den Anforderungen an das Messsystem beschrieben, ist nur eine eingeschränkte Baugröße zulässig. Bestehende Systeme sind dafür zu groß.

Bei der Messung der Bildkoordinaten werden die genauesten Ergebnisse erzielt, wenn die Punkte durch Marken signalisiert sind. Neben einer Vorbereitung des Objektbereichs durch das Anbringen von Markern, muss auch die Auswertesoftware Algorithmen anbieten, die es ermöglichen, diese Marker im Bild automatisch zu detektieren und deren Position zu messen.

Das neue Messsystem wird zusammen mit anderen onboard Kameras im Fahrzeug betrieben. Die erzeugten Bildaufnahmen werden nach dem Versuch aus den Speichern der Kameras ausgelesen und anschließend den Anwendern zur Verfügung gestellt. Die gesamte Auswertung kann demnach offline erfolgen.

Bei der Auswertung gilt es aus wirtschaftlichen Gründen, ähnlich wie bei der verwendeten Technologie, nach Möglichkeit Software und Tools zu nutzen, die bereits für die photogrammetrische Analyse von Bildaufnahmen genutzt werden. Dies würde die Akzeptanz des Messsystems erhöhen und die entstehenden Zusatzaufwände gering halten.

## 2.2 Technischer Hintergrund

Nach der vorhergehenden Definition der Messsystem-Anforderungen werden im folgenden Abschnitt die technischen Hintergründe zu Endoskopen und Kameratechnik sowie zur geometrischen Kalibrierung vorgestellt. Dadurch wird die technische Basis für die in Kapitel 3.2 folgende Wahl der verwendeten Komponenten des Messsystems gelegt.

### 2.2.1 Endoskopie

Grundsätzlich wird in der Endoskopie zwischen starren und flexiblen Endoskopen unterschieden. Zu den starren Endoskopen zählen die Boreskope oder Periskope, zu den flexiblen und steuerbaren Endoskopen gehören die Faserendoskope. Die Unterschiede, sowie die jeweils spezifischen Eigenschaften der beiden Unterarten werden im vorliegenden Kapitel beschrieben.

#### 2.2.1.1 Starre Endoskope

Einfach beschrieben kann gesagt werden, dass starre Endoskope aus einem Rohr bestehen, an dessen vorderem Ende ein Objektiv zur Vergrößerung des Sichtfeldes befestigt ist (RELING 1988). Das dort erzeugte Bild wird über ein Linsensystem, dem sogenannten