

Karsten Raguse

**Dreidimensionale photogrammetrische Auswertung
asynchron aufgenommener Bildsequenzen
mittels Punktverfolgungsverfahren**

München 2007

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**

ISSN 0065-5325

ISBN 3 7696 5041 7

Dreidimensionale photogrammetrische Auswertung
asynchron aufgenommener Bildsequenzen
mittels Punktverfolgungsverfahren

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Karsten Raguse

München 2007

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

ISSN 0065-5325

ISBN 3 7696 5041 7

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 265, Hannover 2007

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 - (0)89 - 23 031 -0 / -1113 • Telefax +49 - (0)89 - 23 031 -1283 / -1100

E-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://dgk.badw.de>

Prüfungskommission

Vorsitzende: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Sester

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke

Korreferenten: Univ.-Prof. Dr. sc. techn. habil. Hans-Gerd Maas

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Kutterer

Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2007

© 2007 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325

ISBN 3 7696 5041 7

Zusammenfassung

Eine grundlegende Voraussetzung für eine präzise photogrammetrische Auswertung bewegter Objekte aus Einzelbildern und Bildsequenzen eines Mehrkamerasystems ist die exakt synchrone Aufnahme. Asynchronitäten zwischen den einzelnen Kameras können zu systematischen Verschiebungen der Objektkoordinaten und zu Vergrößerungen der Standardabweichungen der Koordinaten führen. Bei vielen Anwendungen werden die Kameras im Vorfeld durch den Einsatz von komplexen Hardware-Komponenten, wie z.B. Triggerboxen, synchronisiert. Jedoch ist diese Art der Synchronisation sehr kostenintensiv und nicht bei allen Anwendungen realisierbar. Aus diesem Grund werden Asynchronitäten häufig nicht registriert und auch nicht im Rahmen der Auswertung berücksichtigt. Dies führt zu fehlerhaften Ergebnissen.

In dieser Arbeit wird ein neues Verfahren zur dreidimensionalen photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren vorgestellt. Dabei sind keine Hardware-Komponenten zur Synchronisation der Kameras oder zur Messung der Asynchronität zwischen den Kameras erforderlich. Das Verfahren beruht auf der Synchronisation von Punktmessungen in den Bildern der Sequenzen. Die Asynchronität wird in Form einer Korrekturfunktion modelliert und in das funktionale Modell der Bündelausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen integriert. Die Parameter der Korrekturfunktion werden als unbekannte Parameter in der Ausgleichung simultan zu den Objektkoordinaten und gegebenenfalls weiteren Unbekannten bestimmt.

Die Verifizierung des Verfahrens erfolgt über zwei Versuche. Im ersten Versuch wird die Rotation einer dreidimensionalen Testtafel mit zwei digitalen Highspeed-Kameras mit einer Aufnahme Frequenz von 1 000 Hz erfasst. Im Rahmen der Auswertung werden die theoretische und die empirische Genauigkeit des Verfahrens bestimmt sowie die für eine korrekte und zuverlässige Bestimmung der Asynchronität mindestens notwendige Anzahl von aufeinander folgenden Bildern ermittelt. Durch die Berücksichtigung der Asynchronität konnte die Standardabweichung der ermittelten Objektkoordinaten bei diesem Versuch etwa um den Faktor 10 verbessert werden. Die Ergebnisse dieses ersten Versuchs belegen die Eignung des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität bei der photogrammetrischen Bildsequenzauswertung.

In einem zweiten Test wird ein Fahrzeugsicherheitsversuch mit sechs räumlich verteilten digitalen Highspeed-Kameras ebenfalls mit einer Aufnahme Frequenz von 1 000 Hz aufgenommen. Die Verbesserungen durch das neue Verfahren zur Bildsequenzauswertung werden zunächst theoretisch untersucht. Im zweiten Teil der Auswertung werden die Verbesserungen für die Analyse der Sicherheitsversuche im Rahmen der Fahrzeugentwicklung aufgezeigt. Durch die Anwendung des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität können die von der Fahrzeugentwicklung geforderten Standardabweichungen für die ermittelten Objektkoordinaten von maximal 5 mm eingehalten werden. Dies ist bei der Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen ohne Berücksichtigung der Asynchronität zwischen den Bildsequenzen nicht realisierbar.

Die Ergebnisse der beiden Versuche zeigen, dass das vorgestellte Verfahren zur dreidimensionalen photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren eine präzise und zuverlässige Berechnung der Objektkoordinaten ermöglicht. Durch die Verwendung des neuen Verfahrens wird die Asynchronität korrekt ermittelt und bei der Objektkoordinatenbestimmung berücksichtigt. Die Standardabweichungen der ermittelten Objektkoordinaten entsprechen den Standardabweichungen, die bei einer Auswertung von synchron aufgenommen Bildsequenzen erzielt werden. Die negativen Auswirkungen der Asynchronität auf die Objektkoordinatenbestimmung können mit dem neuen Verfahren praktisch vollständig eliminiert werden.

Stichworte: Bildsequenzauswertung, Asynchronität, Punktverfolgungsverfahren

Summary

For the three-dimensional photogrammetric analysis of moving objects through single images and image sequences acquired with a multi-camera system one important precondition has to be guaranteed: all cameras of the acquisition network have to be synchronised. Otherwise the results of the photogrammetric image sequence analysis suffer from systematic shifts of the object points or a larger standard deviation of the object coordinates. In order to obtain synchronous image sequences in most applications hardware devices as e.g. trigger boxes are used. However, this type of synchronisation is not suitable for all applications and is very cost-intensive. If the asynchronism is not considered during analysis, incorrect results are determined.

In this thesis a new approach for the three-dimensional photogrammetric analysis of asynchronously acquired image sequences using point tracking algorithms is presented. Using the approach no hardware devices must be used for the synchronisation of the cameras or for the measurement of the asynchronism during image acquisition. The synchronisation is carried out in combination with the photogrammetric image sequence analysis: the asynchronism is modelled through a temporal correction function and is introduced to the functional model of the bundle adjustment. The parameters of the temporal correction function describe the asynchronism. These parameters are regarded as unknowns of the bundle adjustment and are determined simultaneously with the object coordinates and the parameters of image orientation.

The verification of the new approach is carried out through the analysis of two practical experiments. In the first case the rotation of a test field is acquired by two digital highspeed cameras with an imaging rate of 1 000 Hz. In the analysis the theoretical and empirical accuracy of the approach are determined. Furthermore, the minimum number of images needed for a precise and reliable calculation of the asynchronism is derived. In this experiment, the consideration of the asynchronism during analysis leads to an improvement of the standard deviation of the calculated object points by factor of 10. The results of this experiment demonstrate the suitability of the approach for the consideration of the asynchronism within the photogrammetric image sequence analysis.

In the second experiment a vehicle impact test is analyzed. The image sequences are acquired by a circular set-up of six digital highspeed cameras with an imaging rate of 1 000 Hz. In the first part of the analysis the effects of considering the asynchronism during the bundle adjustment are tested theoretically. The improvements for the analysis of vehicle impact tests are shown in the second part of the analysis. With the presented new approach, the required standard deviation of 5 mm for the object points in the image sequence analysis of vehicle impact tests is achieved. The results of an analysis which neglects the asynchronism can not match these requirements.

The results of the two experiments show the potential of the presented approach. The object coordinates are calculated precisely and reliably. The standard deviation of the calculated object points is comparable to the standard deviation, which can be achieved when analyzing synchronously acquired image sequences. The negative effects on the object coordinate determination due to neglecting the asynchronism are nearly completely eliminated through the use of the presented approach.

Keywords: image sequence analysis, asynchronism, point tracking algorithms

Inhalt

1	Einleitung	9
1.1	Zielsetzung der Arbeit	10
1.2	Gliederung der Arbeit	11
2	Stand der Wissenschaft und Technik	12
2.1	Geometrische Auswirkung der Asynchronität.....	12
2.2	Verfahren für die spatio-temporale Auswertung von Bildsequenzen	14
2.3	Verfahren zur synchronen Bildsequenzauswertung.....	15
2.3.1	Ein-Sequenz-Verfahren	16
2.3.2	Synchronisation über Hardware-Komponenten.....	16
2.3.2.1	Trigger-Systeme	16
2.3.2.2	Spiegel-Systeme	18
2.3.3	Synchronisation durch kombinierte Verfahren	20
2.3.3.1	Zeitstempel	21
2.3.3.2	Elektronische Uhr	21
2.3.3.3	Synchronometer	22
2.3.4	Synchronisation durch Software	24
2.3.4.1	Grauwertbasierte Verfahren.....	26
2.3.4.2	Merkmalsbasierte Verfahren.....	27
2.3.4.3	Kamerabewegungs-basierte Verfahren	31
2.4	Zusammenfassung	32
2.4.1	Bewertung der merkmalsbasierten Verfahren.....	32
2.4.2	Anforderungen an einen neuen Ansatz	33
3	Theorie des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität	34
3.1	Strategie und Modellierung	34
3.1.1	Anforderungen und allgemeines Konzept.....	34
3.1.2	Asynchronität als Komponente der Optischen Messkette	34
3.1.3	Modellierung der Asynchronität	35
3.2	Integration der Asynchronität in die Bündelausgleichung	36
3.2.1	Grundprinzip der Auswertung	36
3.2.2	Bestimmung des Interpolationsfaktors aus der Asynchronität.....	38
3.2.3	Bildraumbasierter Ansatz	39
3.2.4	Objektraumbasierter Ansatz	40
3.2.5	Ausgleichungsmodell	41
3.3	Diskussion zur Anwendbarkeit des Ansatzes	41

4	Experimentelle Untersuchungen	43
4.1	Allgemeine Versuchsausrüstung.....	43
4.1.1	Highspeed-Kameras	43
4.1.2	Zielmarkentypen und Bildkoordinatenmessung.....	44
4.1.3	Beleuchtungseinrichtung.....	45
4.2	Versuch 1 – Rotation einer SAE-Testtafel	45
4.2.1	Räumliches Bezugssystem	45
4.2.2	Versuchskonstellation	46
4.2.3	Versuchsvorbereitung und -durchführung	47
4.3	Versuch 2 - Sicherheitsversuch	48
4.3.1	Räumliches Bezugssystem	48
4.3.2	Versuchskonstellation	48
4.3.3	Versuchsvorbereitung und -durchführung	49
5	Auswertung und Analyse der Rotation der SAE-Testtafel	52
5.1	Bestimmung eines Referenzwerts für die Asynchronität.....	52
5.2	Bestimmung der theoretischen Genauigkeit.....	53
5.2.1	Bildsequenzauswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität	54
5.2.2	Bildsequenzauswertung mit Berücksichtigung der Asynchronität.....	55
5.2.3	Analyse und Bewertung der Ergebnisse.....	56
5.3	Bestimmung der empirischen Genauigkeit.....	57
5.3.1	Bildsequenzauswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität	58
5.3.2	Analyse und Bewertung der Ergebnisse.....	59
5.4	Reduzierung der Anzahl der aufeinander folgenden Bilder	61
5.5	Zusammenfassung der Analysen und Bewertung des ersten Versuchs.....	63
6	Auswertung und Analyse eines Sicherheitsversuchs	64
6.1	Auswahl der Funktion zur Modellierung der Asynchronität.....	66
6.1.1	Statistische Untersuchung der Asynchronitätsparameter	66
6.1.2	Auswirkungen der unterschiedlichen Modellierungen auf die Objektkoordinaten	67
6.1.3	Modellierung der Asynchronität aus verschiedenen Ausschnitten der gesamten Bildsequenz.....	68
6.1.4	Analyse der Auswertungen und Festlegung der Modellierungsfunktion	69
6.2	Plausibilitätskontrolle der ermittelten Asynchronitäten im Kameraverband.....	70
6.2.1	Berechnung der Asynchronitäten zwischen den Kameras aus unterschiedlichen Konstellationen	70
6.2.2	Auswirkung der Reduzierung der Anzahl der Bilder auf die Ergebnisse der Auswertung	73
6.2.3	Analyse der Ergebnisse und abschließende Bewertung der Plausibilität	74

6.3	Berechnung der Position und Bewegung des Dummykopfs in Relation zur A-Säule	75
6.3.1	Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität	76
6.3.2	Ermittlung des Abstands zwischen Dummykopf und A-Säule	78
6.3.3	Vergleich und Analyse der Ergebnisse	80
6.4	Bereitstellung der Versuchsergebnisse für den Vergleich mit der Simulation	82
6.4.1	Transformation der Ergebnisse der Bildsequenzauswertung ins Fahrzeugkoordinatensystem.....	83
6.4.2	Aufbereitung der Versuchsergebnisse für den Vergleich mit der Simulation des Versuchs.....	85
6.4.3	Analyse der Ergebnisse der Auswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität	87
6.5	Analyse und Bewertung der Versuchsergebnisse.....	87
7	Bewertung und Ausblick	89
8	Literatur	92
Dank		96
Lebenslauf		97

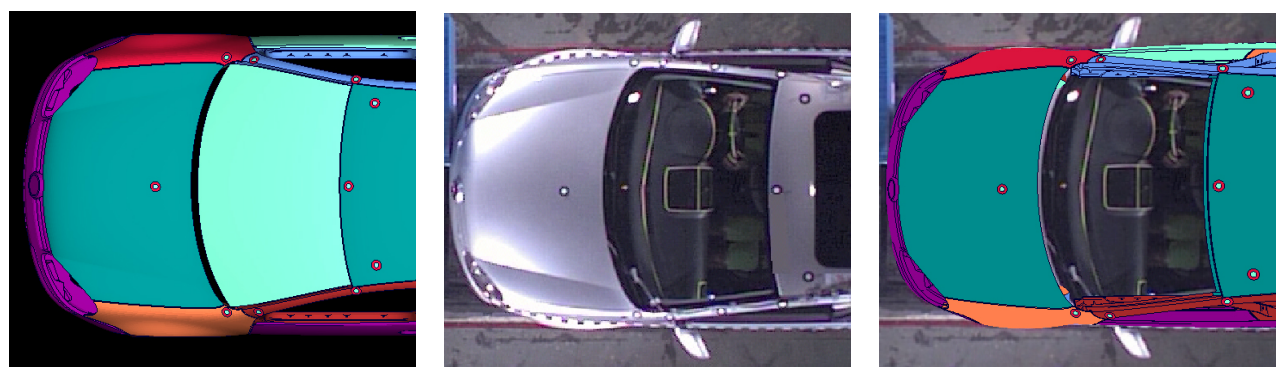
Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

1 Einleitung

Durch die stetige Weiterentwicklung von digitalen Video- und Highspeed-Kameras ergeben sich neue Anwendungsgebiete für die photogrammetrische Bildsequenzauswertung. Eine wichtige und aktuelle Anwendung ist die dreidimensionale photogrammetrische Bildsequenzauswertung von Sicherheitsversuchen in der Automobilentwicklung. Die zweidimensionale Auswertung dieser Versuche wird bereits seit Jahren durchgeführt und ist für Fragestellungen im Rahmen der Fahrzeugentwicklung, wie beispielsweise der Bestimmung der zweidimensionalen Bewegung der Lenksäule des Fahrzeugs oder des Dummykopfs, ein bewährtes Messverfahren (KÖLLER et al. 1993). Aufgrund neuer Entwicklungen bei der Fahrzeugsicherheit wird eine dreidimensionale photogrammetrische Bildsequenzauswertung der Sicherheitsversuche immer wichtiger. Die Lösung bestimmter Fragestellungen, wie beispielsweise die Bestimmung der dreidimensionalen Fahrzeug- und Dummykinematik während des Sicherheitsversuchs, werden durch die Ergebnisse der photogrammetrischen Bildsequenzauswertung deutlich vereinfacht. Die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung werden im Rahmen der Analyse der durchgeführten Versuche zusammen mit anderen Messwerten, wie z.B. den Beschleunigungsmessungen im Dummy und im Fahrzeug, zur Bewertung der Versuche herangezogen.

Auf der anderen Seite wird die Anzahl der durchgeführten Sicherheitsversuche mit Fahrzeugprototypen stetig reduziert. Ein Großteil der Entwicklung der Sicherheit der Fahrzeuge wird bereits im Computer anhand virtueller Fahrzeugmodelle durchgeführt (STREILEIN & HILLMANN 2002, FRISCH 2004). Dafür werden die unterschiedlichen Sicherheitsversuche mit einem virtuellen Fahrzeug simuliert und die Werte für die jeweiligen Kriterien, wie z.B. den Verletzungskriterien des Fahrers, zur Bewertung des Versuchs rechnerisch ermittelt. Erst wenn das virtuelle Fahrzeug die Sicherheitsstandards erfüllt, werden Prototypen des Fahrzeugs gebaut und reale Sicherheitsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche werden anschließend mit den Ergebnissen der Simulation des Versuchs verglichen.

Neben dem Vergleich der ermittelten Werte für die Bewertungskriterien aus Simulation und durchgeführtem Sicherheitsversuch ist auch der Vergleich der dreidimensionalen Bewegung des Fahrzeugs und der Dummys aus Simulation und Versuch von großer Bedeutung. Dieser Vergleich wird unter anderem mit den Ergebnissen der dreidimensionalen photogrammetrischen Bildsequenzauswertung durchgeführt (RAGUSE et al. 2004). Dafür werden die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung für eine direkte Überlagerung der Simulation über die Versuchsfilme aufbereitet, so dass ein visueller Vergleich zwischen Simulation und Versuch erfolgen kann. In Abbildung 1-1 sind die Simulation (Abbildung 1-1a), ein Bild des Versuchsfilms (Abbildung 1-1b) sowie die Überlagerung des Films mit der Simulation (Abbildung 1-1c) dargestellt. Für die synchrone Überlagerung müssen neben einer exakten Bildsequenzauswertung unter Berücksichtigung einer eventuell vorhandenen Asynchronität zwischen den Kameras, die unterschiedlichen Koordinatensysteme des Versuchs und der Simulation sowie die Parameter der inneren und äußeren Orientierungen der Kameras berücksichtigt werden.



a) Simulation

b) Bild aus Versuchsfilm

c) Überlagerte Darstellung

Abbildung 1-1: Vergleich der Simulation mit einem Versuchsfilm des Sicherheitsversuchs durch die direkte synchrone Überlagerung

Zusätzlich zum visuellen Vergleich werden die dreidimensionalen Bewegungen von Zielmarken, die am Fahrzeug und an den Dummies angebracht sind, aus den Versuchsfilmen photogrammetrisch ermittelt und mit den Bewegungen des Fahrzeugs und der Dummies aus der Simulation verglichen. Dadurch kann bestimmt werden, ob und gegebenenfalls ab welchem Zeitpunkt sich das Fahrzeug, ein bestimmtes Bauteil des Fahrzeugs oder einer der Dummies anders bewegt hat als in der Simulation prädictiert. Mit der dreidimensionalen Bildsequenzauswertung stehen somit weitere wichtige Informationen für die Optimierung der Fahrzeugsicherheit zur Verfügung.

Eine präzise Bildsequenzauswertung ist für die Analysen des Vergleichs der Simulation mit dem durchgeführten Sicherheitsversuch unbedingt notwendig. Zurzeit wird die ISO 8721: *Road vehicles – Measurement techniques in impact tests – Optical instrumentation* (ISO 8721 1986) zur Bewertung der zwei- und dreidimensionalen Bildsequenzauswertung von Sicherheitsversuchen überarbeitet. In der Neufassung der ISO 8721 werden alle relevanten Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der berechneten Objektkoordinaten einzeln analysiert und bewertet (RAGUSE & WIGGENHAGEN 2003). Diese Einflussfaktoren, wie z.B. die Art der Signalisierung der Zielmarken, die Verteilung der Passpunkte im Messvolumen, die Genauigkeit der Kamerakalibrierung oder die Asynchronität zwischen den eingesetzten Kameras werden als Optische Messkette bezeichnet.

Je nach Art des Sicherheitsversuchs und der eingesetzten Highspeed-Kameras ist eine synchrone Aufnahme der Bewegungsvorgänge mit allen Kameras jedoch im Allgemeinen nicht garantiert. Für die präzise photogrammetrische Bildsequenzauswertung von dreidimensionalen Bewegungsvorgängen ist die synchrone Erfassung der Einzelbilder in den Sequenzen allerdings eine grundlegende Voraussetzung. Bei einer für einen Sicherheitsversuch typischen Aufnahmekonstellation führt eine Asynchronität von 0.5 ms bereits zu einer Verschiebung eines Objektpunkts von bis zu 30 mm. Da bei den Analysen dieser Versuche eine Standardabweichung der Objektkoordinaten von maximal 5 mm gefordert wird, muss die Asynchronität bei dieser Konstellation kleiner als 0.1 ms sein oder rechnerisch berücksichtigt werden. Bei einigen Versuchsarten werden komplexe elektronische Hardware-Komponenten eingesetzt, die die Synchronität der Bildsequenzen gewährleisten sollen. Allerdings sind diese Systeme meistens nur als Komplettpaket eines Herstellers verfügbar und bestehen aus Kameras, Kabelverbindungen und Steuereinheit zur Synchronisation. Daher ist diese Art der Synchronisation meist sehr kostenintensiv und der Einsatz dieser Komponenten kann nicht bei allen Versuchsarten realisiert werden. Somit muss die Asynchronität zwischen den Sequenzen im Rahmen der Bildsequenzauswertung berücksichtigt werden. Ansonsten ist eine den Genauigkeitsanforderungen entsprechende Bestimmung der Bewegungen der Objekte bei Sicherheitsversuchen nicht möglich.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur dreidimensionalen photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren. Dabei wird eine eventuell vorhandene Asynchronität zwischen den Bildsequenzen im Rahmen der photogrammetrischen Bildsequenzauswertung bestimmt und berücksichtigt. Es werden keine Hardware-Komponenten eingesetzt, die eine synchrone Aufnahme der Bildsequenzen während des Versuchs sicherstellen sollen. Um einen flexiblen Einsatz zu gewährleisten, dürfen sich durch die Verwendung des neuen Verfahrens keine Einschränkungen der Aufnahmekonstellation ergeben. Primäres Ziel der Verfahrensentwicklung ist es, die Effekte der Asynchronität zu bestimmen und als Korrektur rechnerisch in der Bündelausgleichung anzubringen um somit dieselbe Standardabweichung der ermittelten Objektkoordinaten zu erreichen, wie bei einer Auswertung von synchron aufgenommenen Sequenzen.

Zur Verifizierung des neuen Verfahrens werden Versuche durchgeführt und analysiert, bei denen die Ausrüstung und die Aufnahmekonstellation für den Einsatz bei Sicherheitsversuchen ausgelegt sind. In einem ersten Versuch wird die Rotation einer dreidimensionalen Testtafel mit zwei digitalen Highspeed-Kameras analysiert. Zur Verifizierung der ermittelten Asynchronität wird bei diesem Versuch eine präzise Uhr im Messvolumen positioniert. Die empirische Standardabweichung wird durch einen Soll-Ist Vergleich einer Strecke auf der sich drehenden Testtafel bestimmt. Im zweiten Versuch wird das Verfahren bei der Bildsequenzauswertung eines Sicherheitsversuchs eingesetzt. Die Ziele der Analysen beider Versuche sind die Bestimmung der Genauigkeit der Bildsequenzauswertung mit dem neuen Verfahren zur Berücksichtigung der Asynchronität und der Vergleich der Ergebnisse zu einer Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität.

Die Anwendung des neuen Verfahrens ist nicht auf den Einsatz bei Fahrzeugsicherheitsversuchen beschränkt, sondern kann prinzipiell auf alle anderen Anwendungen, bei denen eine photogrammetrische Bildsequenzauswertung auf der Basis von Punktverfolgungsverfahren erfolgt, übertragen werden.

1.2 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel unterteilt. In Kapitel 2 wird der Stand der Wissenschaft und Technik dargestellt. Im ersten Teil des Kapitels werden die Effekte der Asynchronität zwischen Kameras eines Aufnahmeverbands auf die Objektkoordinatenbestimmung erläutert. Im zweiten Teil des Kapitels werden die unterschiedlichen Methoden für eine Vermeidung oder Berücksichtigung einer Asynchronität bei der Bildsequenzauswertung beschrieben. Diese Methoden werden im Anschluss daran bewertet und daraus werden die Anforderungen an das neue Verfahren zur Berücksichtigung der Asynchronität abgeleitet.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte neue Verfahren zur photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen wird in Kapitel 3 erläutert. Dabei werden die Modellierung der Asynchronität über eine Korrekturfunktion und die Integration dieser Funktion in das funktionale Modell der Bündelausgleichung erläutert. Des Weiteren werden die Voraussetzungen für das neue Verfahren diskutiert.

Die Versuchsausrüstungen und die Versuchsbedingungen der beiden zur Verifizierung des neuen Verfahrens durchgeführten experimentellen Untersuchungen werden in Kapitel 4 beschrieben.

Die Auswertung und Analyse des ersten Versuchs, der Rotation einer dreidimensionalen SAE-Testtafel, wird in Kapitel 5 beschrieben. Die Ergebnisse der Überprüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität und die ermittelte theoretische und empirische Genauigkeit des Verfahrens werden detailliert diskutiert.

In Kapitel 6 wird die Auswertung und die Analyse des zweiten Versuchs, eines Fahrzeugsicherheitsversuchs, erläutert. Dabei wird die Anwendbarkeit des Verfahrens bei der Analyse von Sicherheitsversuchen überprüft und die Möglichkeit zur Genauigkeitssteigerung der Versuchsauswertung durch die Berücksichtigung der Asynchronität aufgezeigt.

Die abschließende Bewertung in Kapitel 7 fasst die methodischen Stärken und Schwächen des entwickelten Verfahrens anhand der Analysen der beiden durchgeführten Versuche zusammen. Im Ausblick werden Vorschläge für weitere Entwicklungen und Optimierungen gegeben.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die photogrammetrische Auswertung von dynamischen Vorgängen stellt ein immer größer werdendes Anwendungsgebiet dar (MAAS 2005). Dazu gehören neben Anwendungen, bei denen die Form eines statischen Objekts mit einer einzelnen bewegten Kamera dreidimensional erfasst wird (POLLEFEYS et al. 2004), auch Anwendungen, bei denen die Bildsequenzen bewegter Objekte mit einer einzelnen stationären Kamera zweidimensional ausgewertet werden (MAAS & HAMPEL 2006). Für die Analyse von räumlichen Objektbewegungen ist es in der Regel notwendig mehrere stationäre oder bewegte Kameras einzusetzen. Die Anwendungen reichen von der dreidimensionalen Bestimmung von Wasseroberflächen (SANTEL 2006), der Bestimmung des dreidimensionalen Strömungsverhaltens von Partikeln in Flüssigkeiten (MAAS 1992, WILLNEFF 2003) oder Gasen (PUTZE 2004), der Bestimmung der Fahrzeug- oder Dummykinematik in Sicherheitsversuchen in der Automobilindustrie (PHILIPPENS 2003, RAGUSE et al. 2004, MCCLENATHAN et al. 2005, RAGUSE & LUHMANN 2006), der Analyse menschlicher Bewegungsabläufe (REMONDINO 2002, D'APUZZO 2003, REMONDINO 2006), der Materialprüfung unter mechanischen und thermischen Belastungen (SCHMIDT et al. 2005, MAAS & HAMPEL 2006, GODDING et al. 2006), der optischen 3D Navigation von Sensoren (SAHRHAGE et al. 2006) bis hin zur Medizintechnik (HOYER et al. 2006) und der Video-Überwachung von Bauwerken oder Plätzen und Anwendungen in der Unterhaltungsindustrie bei Spielfilmen oder Computerspielen. Da bei den aufgeführten dynamischen Anwendungen stets mehrere Bildsequenzen für die Auswertung verwendet werden, ist die synchrone Aufnahme der Einzelbilder der Sequenzen eine wichtige Voraussetzung für die präzise photogrammetrische Auswertung der Bewegungsvorgänge (RAGUSE & WIGGENHAGEN 2003). Die Auswirkungen einer Asynchronität auf die Genauigkeit der Objektpunkte sind von der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung des Objekts sowie von der Aufnahmekonfiguration und der Aufnahmefrequenz der Kameras abhängig. Je nach Anwendungsgebiet und Anforderungen an die Genauigkeit der Synchronität gibt es unterschiedliche Methoden für die Synchronisation der Bildsequenzen.

In diesem Kapitel wird zunächst die Auswirkung einer Asynchronität zwischen Einzelbildern bzw. Bildsequenzen auf die Objektkoordinatenbestimmung beschrieben. Im Anschluss daran werden die verschiedenen Verfahren zur Synchronisation der Bildsequenzen bzw. zur Synchronisation der Messwerte in den Bildern vorgestellt und bewertet.

2.1 Geometrische Auswirkung der Asynchronität

Die Asynchronität zwischen Einzelbildern bzw. Bildsequenzen kann die Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung bewegter Objekte unterschiedlich beeinflussen. Die Auswirkung ist von der Objektgeschwindigkeit, der Bewegungsrichtung des Objekts in Relation zur Aufnahmekonstellation, der Aufnahmefrequenz der Kameras sowie der Anzahl der Kameras abhängig. Anhand des Beispiels einer Aufnahmekonstellation bestehend aus zwei Kameras bei der sich das Objekt innerhalb der Epipolarebene und parallel zur Aufnahmebasis bewegt, lässt sich die geometrische Auswirkung der Asynchronität als systematische Verschiebung der berechneten Objektpunktkoordinaten vereinfacht anhand Abbildung 2-1 beschreiben.

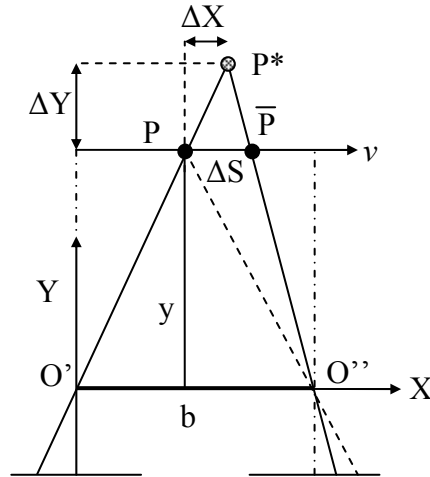


Abbildung 2-1: Systematische Verschiebung der Objektkoordinaten als Auswirkung der Asynchronität (LUHMANN 2003, verändert)

Ein Objektpunkt P , der sich mit einer definierten Geschwindigkeit v innerhalb der Epipolarebene in X -Richtung bewegt, wird von den zwei Kamerastandpunkten O' und O'' aus einer Aufnahmeentfernung y beobachtet. Die Aufnahmebasis b zwischen den beiden Standpunkten ist parallel zur Bewegungsrichtung des Objektpunkts P .

Nehmen die beiden Kameras synchron auf, wird der Objektpunkt exakt zum gleichen Zeitpunkt von beiden Kameras erfasst. Die photogrammetrische Auswertung dieser Messungen ergibt die wahren Objektkoordinaten für den Objektpunkt P . Erfasst dagegen die Kamera auf dem Standpunkt O'' die Szene etwas später, nimmt sie also in Bezug zur Kamera auf Standpunkt O' zeitversetzt auf, erfasst die zweite Kamera den Objektpunkt P erst in der Position $\bar{P}$. Der Objektpunkt hat in dieser Zeit die Wegstrecke ΔS zurückgelegt, die in Abhängigkeit von der Asynchronität Δt zwischen den Bildsequenzen und der Geschwindigkeit v des Objekts wie folgt berechnet werden kann:

$$\Delta S = \Delta t \cdot v \quad (2.1)$$

mit

- ΔS : Wegstrecke [m]
- Δt : Asynchronität [s]
- v : Objektgeschwindigkeit [m/s]

Eine Auswertung der beiden asynchronen Messungen über eine Triangulation führt zu den Objektkoordinaten P^* . Diese sind in Bezug zur wahren Position P um ΔX und ΔY verschoben. Die geometrische Auswirkung der Asynchronität ist in diesem Fall eine systematische Verschiebung des Punkts P in der Epipolarebene. Die Standardabweichung der Objektpunktbestimmung bleibt von den Effekten der Asynchronität unbeeinflusst, da sich die Strahlen exakt in einem Punkt schneiden. Liegt der Objektpunkt P in X -Richtung annähernd zwischen den beiden Standpunkten O' und O'' , so lassen sich die Effekte der Asynchronität auf die dreidimensionale Punktbestimmung über die Formel (2.2) abschätzen.

$$\Delta X \approx \frac{\Delta S}{2} \quad \text{und} \quad \Delta Y \approx \Delta S \cdot \frac{y}{b} \quad (2.2)$$

mit

- ΔX : Systematische Verschiebung der Objektkoordinaten in Bewegungsrichtung [m]
- ΔY : Systematische Verschiebung der Objektkoordinaten in Aufnahmerichtung [m]
- y : Aufnahmeentfernung [m]
- b : Basislänge zwischen den beiden Kameras [m]

Verläuft die Bewegung des Objekts nicht innerhalb der Epipolarebene, so wirkt sich die Asynchronität nicht ausschließlich als systematische Objektpunktverschiebung aus, sondern auch als Vergrößerung der Standardabweichung der ermittelten Objektpunktkoordinaten von P . In diesem Fall schneiden sich die Abbildungsstrahlen nicht in einem Punkt, sondern verlaufen windschief im Raum. Wenn die Bewegungsrichtung des Objektpunkts exakt senkrecht zur Epipolarebene verläuft wirkt sich die Asynchronität fast ausschließlich als Vergrößerung der Standardabweichungen aus. Im Allgemeinen treten die beiden Effekte, die systematische Verschiebung des Punkts in der Epipolarebene und die Vergrößerung der Standardabweichung der Objektkoordinaten, in Kombination auf.

2.2 Verfahren für die spatio-temporale Auswertung von Bildsequenzen

Eine spatio-temporale Auswertung von Bildsequenzen beschreibt die Art der räumlichen und zeitlichen Transformation eines einzelnen Bilds einer Sequenz zum zugehörigen Bild einer anderen Sequenz. Die spatio-temporale Auswertung setzt eine Bildzuordnung, also die Bestimmung der homologen Punkte, in den Bildern der Sequenzen voraus.

Die Verfahren zur spatio-temporalen Auswertung von Bildsequenzen unterscheiden sich in der Art der Auswertung. Diese Verfahren können in zwei Gruppen unterteilt werden. Bei den Verfahren der ersten Gruppe werden die Bildsequenzen nur als Folge von Einzelbildern betrachtet, die jeweils unabhängig voneinander ausgewertet werden. Die Auswertung erfolgt analog zu einer statischen photogrammetrischen Auswertung ohne die Verwendung von Informationen oder Ergebnissen der Auswertung eines vorangegangenen oder anschließenden Zeitschritts der Sequenz. Die Ergebnisse der Auswertungen der einzelnen Zeitschritte werden im Anschluss an die räumliche Auswertung aneinandergereiht. Dadurch werden z.B. dreidimensionale Trajektorien von Objektpunkten generiert. Eventuell auftretende Korrelationen zwischen den räumlichen und zeitlichen Zuordnungsparametern werden bei dieser Art der Bildsequenzauswertung nicht berücksichtigt und führen zu Ungenauigkeiten in den Ergebnissen der Auswertung.

Die Verfahren der zweiten Gruppe der spatio-temporalen Auswerteverfahren nutzen für die Auswertung eines Zeitschritts Vorwissen aus der Auswertung vorhergehender oder nachfolgender Zeitschritte. In SANTEL (2006) werden z.B. jeweils die Ergebnisse eines Zeitschritts, also die dreidimensionalen Objektkoordinaten, als Näherungswerte für die Auswertung des folgenden Zeitschritts genutzt. Dadurch wird der Suchbereich für homologe Punkte im Bild eingegrenzt und die Möglichkeit von Fehlzuordnungen reduziert.

Des Weiteren können bei dieser Gruppe von Verfahren zusätzlich Bewegungsmodelle berücksichtigt werden (D'APUZZO 2003, PUTZE 2004). Durch die Einführung von Bewegungsmodellen wird die Position aus der Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit der Objektpunkte z.B. aus vorherigen Zeitpunkten prädiziert. Die Suche nach möglichen Zuordnungen kann somit optimiert werden.

Generell können die Suche nach möglichen homologen Punkten und die Prädiktion z.B. über Bewegungsmodelle sowohl im Bild- als auch im Objektraum erfolgen. Durch eine Verkettung der Zuordnung im Bild- und im Objektraum stehen weitere Informationen zur Verfügung und die Ergebnisse der Auswertung werden robuster gegenüber Fehlzuordnungen (WILLNEFF 2003).

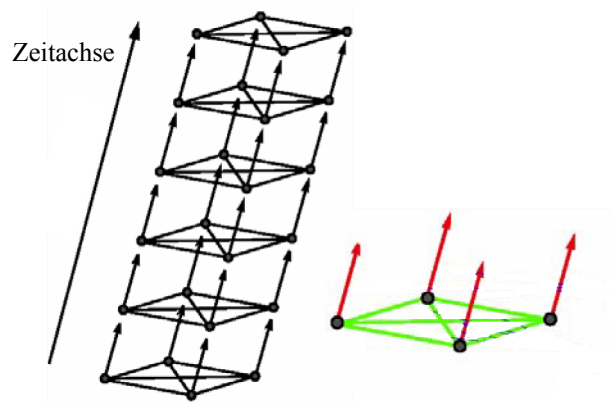


Abbildung 2-2: Darstellung der Redundanz im spatio-temporalen Zuordnungsprozess (MAAS 2005, verändert)

In Abbildung 2-2 ist die zur Verfügung stehende Information bei einer spatio-temporalen Auswertung von vier Bildsequenzen schematisch dargestellt. Im linken Teil der Abbildung 2-2 sind alle direkten räumlichen und zeitlichen Transformationen über die gesamte Bildsequenz durch Verbindungslinien gekennzeichnet. Die Bilder der Sequenzen können sowohl räumlich, also zu den anderen zum gleichen Zeitpunkt aufgenommenen Bildern, als auch zeitlich, also zu den Bildern des nächsten Zeitschritts, zugeordnet werden. Zur Verdeutlichung ist im rechten Teil der Abbildung 2-2 ein Zeitschritt aus den vier Sequenzen herausgegriffen. Die schwarzen Punkte stellen jeweils ein Bild aus den vier Sequenzen dar. Die grünen Verbindungslinien zwischen den vier Punkten veranschaulichen die möglichen räumlichen Zuordnungen. Die roten Pfeile bilden entsprechend alle möglichen zeitlichen Zuordnungen der Auswertung ab.

Für die Berechnung einer dreidimensionalen Trajektorie im Rahmen der Bildsequenzauswertung sind nicht immer alle Zuordnungen notwendig. Treten keine Mehrdeutigkeiten oder Verdeckungen bei der Auswertung auf, reichen in dem in Abbildung 2-2 aufgeführten Beispiel zur spatio-temporalen Auswertung von vier Bildsequenzen jeweils drei räumliche Zuordnungen und eine zeitliche Zuordnung für einen Zeitschritt und den Übergang zum nächsten Zeitschritt aus. Da in den meisten Fällen jedoch aufgrund von nicht lösbaren Mehrdeutigkeiten oder temporären partiellen Verdeckungen nicht immer alle Zuordnungen genutzt werden können, wird die Redundanz bei der spatio-temporalen Auswertung der Bildsequenzen genutzt um eine präzise und robuste Bildsequenzauswertung zu ermöglichen.

2.3 Verfahren zur synchronen Bildsequenzauswertung

Zur Bestimmung dreidimensionaler Objektbewegungen aus Bildsequenzen können verschiedene Verfahren angewendet werden. Zum einen gibt es Verfahren, welche die dreidimensionalen Objektkoordinaten durch die Auswertung einer einzigen Sequenz liefern, die so genannten Ein-Sequenz-Verfahren.

Zum anderen gibt es Verfahren, die mehr als nur eine Bildsequenz für die dreidimensionale Koordinatenbestimmung nutzen. In diesem Fall müssen die Auswirkungen einer eventuell vorhandenen Asynchronität berücksichtigt werden. Um die Synchronität der Bildsequenzen sicher zu stellen bzw. eine eventuell vorhandene Asynchronität bei der Bestimmung der Objektkoordinaten zu berücksichtigen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Diese lassen sich in drei Hauptgruppen unterteilen: hardwarebasierte Verfahren, kombinierte Hardware-Software Verfahren und softwarebasierte Verfahren. Die Details zu den Verfahren dieser drei Gruppen werden im Folgenden erläutert und bewertet.

Da das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Hauptgruppe der softwarebasierten Verfahren gehört, werden die anderen beiden Hauptgruppen der Verfahren zur Synchronisation der Bildsequenzen ebenso wie die Ein-Sequenz-Verfahren nur zur Vollständigkeit der Übersicht über die Verfahren zur Bildsequenzauswertung in diesem Abschnitt beschrieben.

2.3.1 Ein-Sequenz-Verfahren

Ein-Sequenz-Verfahren sind Verfahren, mit denen sich im Rahmen der Auswertung aus einer einzelnen Bildsequenz dreidimensionale Objektbewegungen bestimmen lassen.

Einige Verfahren nutzen eine spezielle Art der Auswertung, wie beispielsweise das so genannte 6-DoF (*six degrees of freedom*) Verfahren (LUHMANN 2005b, SAHRHAGE et al. 2006). Bei diesem Verfahren werden die Position und die Orientierung eines bewegten Objekts innerhalb der Bildsequenz bestimmt. Dafür ist es unabdingbar, dass auf dem bewegten Objekt ein signalisiertes und kalibriertes Punktfeld existiert. Damit dieses Verfahren zu korrekten Ergebnissen führt, darf sich das Punktfeld während der Aufnahme nicht deformieren und muss über die gesamte auszuwertende Bildsequenz sichtbar sein. Die Genauigkeit des Verfahrens ist abhängig von der Größe bzw. der räumlichen Verteilung der Punkte auf dem Objekt. Je kleiner das Punktfeld ist, desto ungenauer können Position und Orientierung des Objekts bestimmt werden.

Eine weitere Gruppe der Ein-Sequenz-Verfahren nutzt spezielle Kombinationen aus aktiven und passiven Sensoren, wie beispielsweise ein Kamera-Projektor System oder ein Kamera-Linienlaser System (MAAS et al. 2003, MULSOW et al. 2005). Bei dieser Art der Verfahren muss die Aufnahmekonfiguration von Projektor bzw. Linienlaser und Kamera fixiert und im Vorfeld exakt bestimmt werden. Dadurch ist die Aufnahmekonstellation nicht flexibel einsetzbar, sondern stets auf bestimmte Anwendungsgebiete oder Messvolumina begrenzt.

Die Auswertung mit einer so genannten 3D-Kamera gehört ebenfalls zur Gruppe der Ein-Sequenz-Verfahren. Bei diesem Verfahren wird eine spezielle Kamera eingesetzt (OGGIER et al. 2004, KAHLMANN & INGENSAND 2005, REULKE 2006). Die Kamera besitzt neben dem Sensor und dem Objektiv zusätzlich noch ein Diodenfeld, von dem eine amplitudenmodulierte Strahlung ausgesandt wird. Diese wird vom Objekt reflektiert und auf dem Sensor der Kamera abgebildet. Dabei werden direkt die Entfernungen zum Objekt gemessen und es wird eine dreidimensionale Darstellung der Objektraumszene generiert. Die derzeit verfügbaren Kameras haben jedoch eine geringe örtliche und zeitliche Auflösung, die zurzeit für viele industrielle Anwendungen noch nicht ausreicht.

Die aufgeführten Ein-Sequenz-Verfahren sind in der Regel nur für bestimmte Aufnahmekonstellationen geeignet und nicht flexibel einsetzbar. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Verfahren nicht näher eingegangen, da aufgrund der Auswertung über eine einzige Bildsequenz keine Effekte einer Asynchronität auftreten können. Weitere Informationen sind der in den entsprechenden Abschnitten angegebenen Literatur zu entnehmen.

2.3.2 Synchronisation über Hardware-Komponenten

Bei den Methoden der ersten Hauptgruppe der Synchronisationsverfahren werden Hardware-Komponenten zur Synchronisation der Bildsequenzen eingesetzt. Dafür sind im Vorfeld der Aufnahmen spezielle Vorbereitungen zu treffen. Die Aufnahme der Sequenzen erfolgt dann synchron, sodass im Hinblick auf eine synchrone Bildsequenzauswertung keine weiteren Schritte im Rahmen der Auswertung erforderlich sind.

Im Folgenden werden zwei Untergruppen von Hardware-Komponenten vorgestellt, die für die Synchronisation von Bildsequenzen eingesetzt werden. In der ersten Untergruppe sind Verfahren zusammengefasst, die mit echten Mehrkamerasystemen arbeiten, d.h. es sind physikalisch mehrere Kameras im Einsatz. Zur Synchronisation werden dabei Komponenten genutzt, die die Kameras synchron triggern. Bei den Verfahren der zweiten Untergruppe wird physikalisch nur eine Kamera verwendet. Durch den Einsatz von Spiegeln werden jedoch mehrere virtuelle Kameras simuliert. Die virtuellen Kameras nehmen per Definition exakt synchron auf, da ihnen ein und dieselbe Elektronik zugrunde liegt.

2.3.2.1 Trigger-Systeme

Das Verfahren der Triggerung von Kameras zur synchronen Erfassung der Bildsequenzen wird bei den meisten Anwendungen für die Bildsequenzauswertung genutzt. Dabei wird ein externes Synchronisations-Triggersignal zur synchronen Erfassung der Bilder verwendet.

Diese Art der Synchronisation wird meist bei Anwendungen eingesetzt, die feste Kamerakonstellationen nutzen, deren Struktur in der Regel nicht verändert wird. Beispiele für derartige Anwendungen sind die Auswertung von Fahrzeugsicherheitsversuchen (RAGUSE et al. 2004, McCLENATHAN et al. 2005), die Bestimmung des Strömungsverhaltens in Flüssigkeiten (WILLNEFF 2003) oder die dynamische dreidimensionalen Bestimmung von Wellenoberflächen (SANTEL 2006).

Die Triggerung zur Synchronisation der Bildsequenzen kann über drei verschiedene Methoden erfolgen, deren Funktionsprinzip jeweils schematisch in Abbildung 2-3 dargestellt ist. In der Abbildung ist das Kameraverhalten in Bezug zum jeweiligen Synchronisationssignal dargestellt.

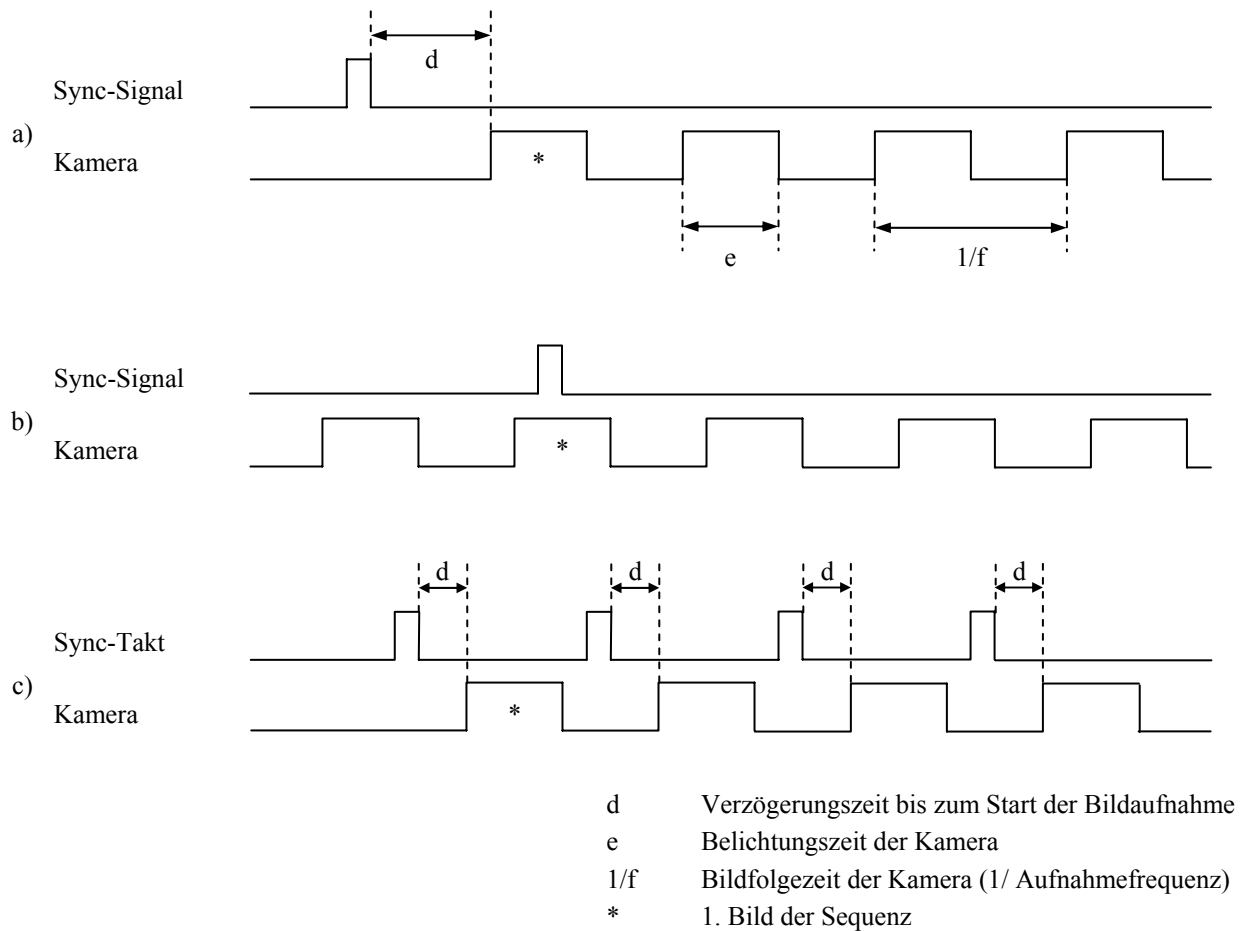


Abbildung 2-3: Synchronisationsverfahren über ein Triggersignal, a) Start-Triggersignal, b) Freies Triggersignal, c) Kontinuierliches Triggersignal

Bei der ersten Methode, dem Start-Triggersignal, wird ein Triggersignal zu allen Kameras gesendet und dadurch die Aufnahme der Bildsequenzen synchron gestartet (siehe Abbildung 2-3a). Der Startzeitpunkt der Aufnahme kann dabei beliebig verzögert werden. Dies hat den Vorteil, dass die jeweilige Kamera, unabhängig davon in welchem internen Zustand sie sich gerade befindet, bis zum Zeitpunkt der Aufnahme des ersten Bilds in den Aufnahmemodus wechseln kann. Die Steuerung der Aufnahme der folgenden Bilder übernimmt der Quarz innerhalb der Kamera.

Bei der zweiten Methode nehmen die Kameras bereits kontinuierlich auf und die Triggerung dient lediglich der Herstellung des Zeitbezugs zwischen den Sequenzen (siehe Abbildung 2-3b). Das erste Bild der Sequenz ist dann das Bild, das gerade aufgenommen wird, wenn das Triggersignal registriert wird oder falls gerade kein Bild aufgenommen wird, das Bild, das als nächstes aufgenommen wird. Der Nachteil dieser Methode ist, dass sich die Kameras zum Zeitpunkt der Signalübertragung in unterschiedlichen Zuständen der Bildaufnahme befinden können. Dadurch kann

eine maximale Asynchronität von einem Bild zwischen den Bildsequenzen der Kameras entstehen. Während der gesamten Aufnahmedauer steuert jeweils der interne Quarz der Kamera die Bildaufnahme.

Bei der dritten Methode wird ein kontinuierliches Synchronisations-Triggersignal an die Kameras gesendet (siehe Abbildung 2-3c). Die Kameras nehmen bei jedem Trigger-Signal ein Bild auf. Der interne Quarz der jeweiligen Kamera wird bei dieser Art der Triggerung für die Steuerung der Bildaufnahme nicht benötigt.

Die Genauigkeit der Synchronisation ist neben den verschiedenen Methoden zur Triggerung von drei weiteren Faktoren abhängig. Diese Faktoren sind die zeitliche Stabilität des Quarzes der zur Triggerung eingesetzt wird, der Zeitverzug der Signalübertragung zu den Kameras und der interne Zeitverzug der Bildaufnahme in den einzelnen Aufnahmesystemen.

Im Allgemeinen werden bei diesen Verfahren alle Kameras des Aufnahmeverbands mit einer zentralen Steuereinheit verbunden, die das Triggersignal generiert und an die Kameras sendet.

Bei manchen Kameratypen, wie z.B. der digitalen Highspeed-Kamera NAC Hi-Dcam II, werden Framegrabber-Karten genutzt. Diese Karten werden in einen Rechner eingesteckt und jede Karte wird mit jeweils einer Kamera verbunden. Über diese Einsteckkarten werden im Folgenden die Signale zu den Kameras gesendet. Diese Lösung ist jedoch aufgrund der kameraspezifischen internen Signalverarbeitung nur mit Kameras des gleichen Typs sinnvoll einsetzbar. Die Anzahl der Kameras ist durch die Anzahl der Einsteckplätze im Rechner begrenzt. Des Weiteren bestehen hier ebenso wie bei den anderen Triggerverfahren Einschränkungen bezüglich der Kabellängen und dadurch auch in der Aufnahmekonfiguration.

Eine weitere Möglichkeit besteht in dem Einsatz spezieller Triggerboxen, an die alle Kameras angeschlossen werden und die entweder das Synchronisations-Triggersignal von einer zentralen Steuereinheit erhalten und an die angeschlossenen Kameras weitergeben oder die die Triggerung der angeschlossenen Kameras selbst realisieren können. Bei der aktuellen Generation von digitalen Highspeed-Kameras, wie z.B. der Redlake HG 100K, werden für die Übertragung Ethernet-Verbindungen genutzt. Durch die Ethernet-Verbindung der Kameras mit den Triggerboxen wird ein abgeschlossenes Netzwerk realisiert, das nicht durch andere Signale gestört werden kann. Dadurch ist die Synchronisation der angeschlossenen Kameras sichergestellt. Die Synchronisation über Triggerboxen ist bei den meisten Systemen sehr präzise. Die Restfehler liegen bei diesem Systemen im Bereich weniger Mikrosekunden und können in der Regel vernachlässigt werden. Jedoch ist die Verwendung von Triggerboxen für viele Anwendungen aufgrund des technischen Aufwands nicht praktikabel.

Sollen unterschiedliche Kameratypen in einem Netz synchronisiert werden, muss bei dieser Art der Synchronisation die Zeit, die die jeweilige Kamera für die interne Signalverarbeitung braucht, also die Zeit zwischen der Ankunft des Triggersignals und dem Beginn der Belichtung, berücksichtigt werden. Diese interne Zeitverzögerung kann je nach Kameratyp deutlich variieren, sodass dieser Aspekt nicht vernachlässigt werden darf.

Eine weitere Besonderheit, die beim Einsatz von Triggern bei unterschiedlichen Kameratypen berücksichtigt werden muss, ist die Tatsache, dass manche Kameratypen auf die steigende Flanke des Triggersignals reagieren und andere auf die fallende Flanke des Signals. Wird dies nicht berücksichtigt, kann dadurch eine Asynchronität entsprechend der Länge des Synchronisationssignals entstehen.

2.3.2.2 Spiegel-Systeme

Spiegel-Systeme sind Messsysteme die aus nur einer Kamera bestehen und die erst durch die Nutzung eines oder mehrerer Spiegel zu Mehrkamerasystemen werden indem durch den oder die Spiegel zusätzliche virtuelle Kamerastandpunkte simuliert werden. Die Gruppe der Spiegel-Systeme kann in zwei Untergruppen gegliedert werden. In der ersten Untergruppe werden Systeme zusammengefasst, die aus einer Kombination von einem Prisma und zwei oder mehr Spiegeln, einem so genannten optischen Strahlteiler, bestehen. Zu der zweiten Untergruppe gehören

Verfahren, bei denen im Messvolumen Spiegel positioniert werden, über die das Objekt zusätzlich aus einer anderen Perspektive gesehen wird und dadurch zusätzliche virtuelle Kamerastandpunkte entstehen.

Bei den Verfahren der ersten Untergruppe wird ein optischer Strahlteiler direkt vor dem Objektiv der Kamera montiert. Bei diesem Messprinzip werden die Abbildungsstrahlen ausgehend vom Objekt über Spiegel auf ein Prisma gelenkt, welches sich mittig vor dem Objektiv befindet. Über die Spiegel-Prisma-Optik wird der Abbildungsstrahl doppelt gebrochen und pro Spiegel wird eine virtuelle Kamera erzeugt. Dadurch werden die Bilder von virtuellen Kamerastandpunkten auf dem Sensor abgebildet. Je nach Anforderung besteht der optische Strahlteiler aus einer unterschiedlichen Anzahl von Spiegeln.

Messsysteme, bei denen zwei Spiegel eingesetzt werden (siehe Abbildung 2-4), werden als Zweifach-Strahlteiler oder auch als Stereospiegelvorsatz bezeichnet (LUHMANN 2005a). Durch die zwei Spiegel werden zwei exakt synchron aufnehmende Kameras simuliert. Des Weiteren gibt es z.B. optische Strahlteiler, die aus vier Spiegelflächen (siehe Abbildung 2-5) in Kombination mit einem Prisma bestehen (PUTZE & HOYER 2005).

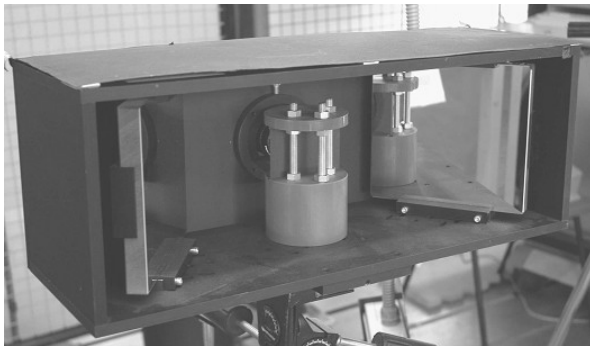


Abbildung 2-4: Stereospiegelvorsatz vor einer digitalen Highspeed-Kamera vom Typ NAC Hi-Dcam II



Abbildung 2-5: Vierfach-Strahlteiler mit einer digitalen Highspeed-Kamera vom Typ Fastcam Ultima 1024 (PUTZE & HOYER 2005)

Die Bildsequenzauswertung mittels optischen Strahlteilers wird beispielsweise im Rahmen von Fußgängerschutzversuchen bei der Fahrzeugentwicklung eingesetzt (RAGUSE & LUHMANN 2006). Dabei wird z.B. das Auftreffverhalten eines Prüfkörpers, der dem menschlichen Bein nachempfunden ist, auf die Fahrzeugfront sowie dessen Flugbahn mittels einer Highspeed-Kamera in Kombination mit einem Stereospiegelvorsatz aufgenommen und photogrammetrisch ausgewertet. Der eingesetzte Stereospiegelvorsatz (siehe Abbildung 2-4) wurde speziell für diesen Anwendungsfall entwickelt und kann nicht ohne aufwändige Modifikationen bei anderen Aufnahmekonstellationen eingesetzt werden.

Eine weitere Anwendung eines optischen Strahlteilers zur synchronen Bildsequenzauswertung beschreibt PUTZE (2004). Mittels eines flexiblen Vierfach-Strahlteilers (siehe Abbildung 2-5) wird die so genannte 3D Particle Tracking Velocimetry (3D-PTV) in Gasen ermittelt. Bei diesem Verfahren werden bewegliche Partikel in einem Gas freigesetzt, deren dreidimensionale Bewegung zu bestimmen ist. Durch die Auswertung aller Partikel-Trajektorien können Aussagen über das Strömungsverhalten und die Geschwindigkeit des Gases erfolgen.

Bei den Verfahren der zweiten Untergruppe der Spiegel-Systeme werden die Spiegel im Messvolumen positioniert (siehe Abbildung 2-6). Durch den Einsatz von Spiegeln werden auch hier zusätzliche virtuelle Kamerastandpunkte simuliert, von denen das Objekt aus einer anderen Perspektive aufgenommen werden kann.

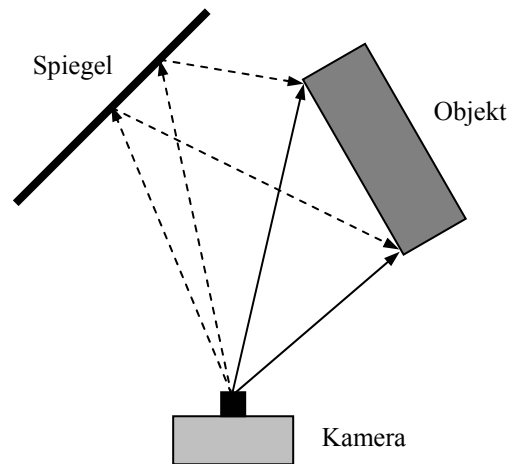


Abbildung 2-6: Aufnahmekonstellation mit Spiegeln im Messvolumen

Eine Kombination aus Kamera und Spiegeln wird meist bei Anwendungen eingesetzt, bei denen das Objekt aus stark unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen werden soll, also bei Konstellationen, bei denen das notwendige Messvolumen durch den Einsatz eines optischen Strahlteilers direkt vor dem Objektiv der Kamera nicht realisierbar ist.

Beide Gruppen der Spiegel-Systeme haben den großen Vorteil, dass mit nur einer Kamera in Kombination mit Spiegeln eine dreidimensionale Auswertung über Triangulation erfolgen kann und sich der Bedarf an Kameras dadurch reduzieren lässt. Des Weiteren ist die synchrone Bilderfassung garantiert. Beim Einsatz eines optischen Strahlteilers besteht ein weiterer Vorteil in der starren Konstruktion der optischen Komponenten zueinander. Dadurch können in einer Vorabkalibrierung sowohl die Parameter der inneren Orientierungen der virtuellen Kameras als auch die Parameter der äußeren Orientierungen in einem Strahlteiler-Koordinatensystem bestimmt werden. Bei der Auswertung der erfassten Bildsequenzen können die vorab bestimmten Orientierungsparameter genutzt werden und es kann direkt eine dreidimensionale Auswertung im Koordinatensystem des optischen Strahlteilers erfolgen. Sind bei den Systemen der zweiten Untergruppe die Komponenten starr zueinander angeordnet, so können die Orientierungen ebenfalls im Vorfeld der Messung bestimmt werden. Ist der Spiegel variabel positionierbar, hat dies zwar den Vorteil der flexibleren Aufnahmekonfiguration, allerdings auch den Nachteil, dass die Elemente der äußeren Orientierungen jeweils neu bestimmt werden müssen. Ein Nachteil beider Systeme besteht darin, dass auf dem Sensor jeweils mehrere Teilbilder abgebildet werden und somit weniger Bildinformation zur Auswertung der einzelnen Bildsequenz zur Verfügung steht. Bei beiden Messsystemen muss die Unebenheit der Spiegel untersucht und gegebenenfalls berücksichtigt werden, da sich diese negativ auf die Standardabweichung der Objektkoordinaten auswirken kann (HASTEDT et al. 2005, PUTZE & HOYER 2005). Des Weiteren ist beim Einsatz eines optischen Strahlteilers die mögliche Aufnahmegeometrie durch die Konstruktion vorgegeben und kann nicht beliebig variiert werden. Eine räumliche Verteilung der Kameras, wie beispielsweise bei einem Rundumverband, ist mit einem optischen Strahlteiler nicht einfach realisierbar. Durch den Einsatz von im Messvolumen verteilten Spiegeln ist im Vergleich zum Einsatz von optischen Strahlteilern eine flexiblere Aufnahmekonstellation möglich, jedoch sind auch bei der Positionierung der Spiegel bestimmte Randbedingungen, wie Sichtbarkeit und Strahlenschnitt am Objekt, zu beachten. Spiegel-Systeme werden meistens für konkrete Anwendungen konzipiert. Für flexible Fragestellungen, bei denen große Messvolumina mit hoher Genauigkeit untersucht werden sollen, sind diese beiden Messsysteme nicht geeignet.

2.3.3 Synchronisation durch kombinierte Verfahren

Bei der Synchronisation durch kombinierte Verfahren werden die Kameras nicht über Hardware-Komponenten synchronisiert und es werden auch zum Zeitpunkt der Aufnahme keine speziellen Komponenten in den Strahlengang eingebracht. Die eingesetzten Kameras nehmen die Objektraumszene unabhängig voneinander auf, d.h. die Sequenzen werden zunächst asynchron erfasst. Der Zeitversatz zwischen den einzelnen Kameras wird während der Aufnahme der Bildsequenzen über Hardware-Komponenten registriert. Die Messungen in den Bildsequenzen werden anschließend im

Rahmen der Auswertung entsprechend der vorliegenden Asynchronität, z.B. durch eine Interpolation der Messwerte, korrigiert.

Für die hardwarebasierte Messung der aktuellen Systemzeit zum Zeitpunkt der Aufnahme werden unterschiedliche Methoden eingesetzt. Beispielsweise werden die Bilder zum Zeitpunkt der Aufnahme mit einem Zeitstempel versehen, sodass der exakte Zeitpunkt der Aufnahme vorliegt. Dazu wird die aktuelle Zeit entweder durch eine kamerainterne Uhr bestimmt oder die Kameras werden mit einer Referenzuhr verbunden, die die Zeit kontinuierlich an die Kameras überträgt.

Bei einer zweiten Methode werden hochgenaue elektronische Uhren im Messvolumen positioniert, sodass sie von allen Kameras des Aufnahmeverbands gesehen werden können. Die Zeitpunkte der Bildaufnahme können dann anhand der im Bild dargestellten Uhr bestimmt werden.

2.3.3.1 Zeitstempel

Bei diesem Verfahren werden alle Kameras eines Aufnahmeverbands über ein Kabel mit einem hochpräzisen Referenz-Zeitsystem verbunden. Über diese Kabelverbindungen wird neben anderen Signalen auch die jeweilige Systemzeit übertragen. Zum Zeitpunkt der Aufnahme wird die Systemzeit in der Kamera registriert und dem Bild als Zeitstempel aufgeprägt. Dies geschieht für jedes Bild jeder Kamera. Somit enthält jedes Bild den Zeitpunkt der Aufnahme codiert im Bild. In NARAYANAN et al. (1995) wird ein Verfahren beschrieben, bei dem zum Zeitpunkt der Aufnahme in jedem Bild die Systemzeit als VITC (*Vertical Interval Time Code*) gespeichert wird. Dieser Code wird bei der anschließenden Auswertung zur Synchronisation der Messungen in den Bildern genutzt.

Der Vorteil eines Zeitstempels besteht darin, dass die Kameras die Sequenzen nicht exakt synchron aufnehmen müssen. Jedoch müssen die Kameras miteinander verbunden werden, damit alle Kameras die Systemzeit erhalten und im jeweiligen Bild abspeichern können. Dies hat zur Folge, dass die Kameras aufgrund der notwendigen Kabelverbindungen, nicht völlig frei positioniert werden können. Des Weiteren müssen alle Kameras die Systemzeit ohne Zeitverzug erhalten und direkt registrieren. Bei unterschiedlichen Kameratypen in einem Aufnahmeverband kann dies zu Fehlern führen, da die Signalverarbeitung in den einzelnen Kameras eventuell unterschiedlich lange dauern kann. Die Kameras erhalten dann zwar alle zum gleichen Zeitpunkt das Zeitsignal, jedoch wird durch die interne Signalverarbeitung ein Zeitversatz registriert, der nicht auf eine Asynchronität bei der Bildaufnahme zurückzuführen ist. Bei der anschließenden Auswertung der Sequenzen werden die Messungen dann um eine falsche Asynchronität korrigiert, was wiederum zu Fehlern bei der Objektkoordinatenbestimmung führt.

2.3.3.2 Elektronische Uhr

Im Bereich der Auswertung von Fahrzeugsicherheitsversuchen werden häufig hochgenaue elektronische Uhren, so genannte Crashuhren, eingesetzt. Diese bestehen aus einem Anzeigefeld, welches in zwei Bereiche unterteilt und speziell auf die Auswertung hochdynamischer Versuche ausgelegt ist (siehe Abbildung 2-7).



Abbildung 2-7: Crashuhr (Highspeed-Display EFE 80, MAK 2006)

Auf der linken Seite des Anzeigefelds wird die Zeit dreistellig in digitaler Form dargestellt und auf der rechten Seite des Anzeigefelds wird die erste Nachkommastelle der Zeit in Form eines Neunerblocks der Zahlen eins bis neun angezeigt. Zwischen den einzelnen Feldern des Neunerblocks kann interpoliert werden, sodass die Ablesegenauigkeit etwas besser als die zeitliche Auflösung der Anzeige ist. Durch den Einsatz dieser Crashuhren können die jeweiligen Aufnahmezeitpunkte den Bildern zugeordnet werden und die Asynchronität kann in der nachfolgenden Auswertung berücksichtigt werden. Dies geschieht beispielsweise durch die Interpolation zwischen den Messungen in der asynchron aufgenommenen Sequenz entsprechend der gemessenen Asynchronität. Je nachdem, welche Interpolationsmethode genutzt werden, entstehen geringe Unterschiede in den berechneten Objektkoordinaten. So setzt z.B. eine lineare Interpolation voraus, dass Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung des Objektpunkts zwischen den Messungen von zwei aufeinander folgenden Zeitpunkten konstant sind.

Der Vorteil dieses Systems liegt in der Unabhängigkeit der Crashuhr von den Kameras. Es muss nur sichergestellt werden, dass sich das Anzeigefeld der Crashuhr im Sichtfeld aller eingesetzten Kameras befindet. Durch den Einsatz mehrerer untereinander verbundener Crashuhren kann so ein kompletter Rundumverband von Kameras synchronisiert werden. Allerdings müssen dann Uhren des gleichen Typs eingesetzt werden und mit speziellen Kabeln verbunden werden. Ansonsten kann es dazu kommen, dass die Uhren unterschiedliche Zeiten anzeigen und somit nicht als Referenz eingesetzt werden können.

In RIEDE et al. (2004) wird eine Variante dieses Verfahrens beschrieben, bei der statt einer Crashuhr ein handelsüblicher Röhrenmonitor mit einer Bildwiederholfrequenz von 75 Hz zur Bestimmung der Asynchronität genutzt wird. Dabei wird die Asynchronität der Kameras aus dem Stand des Bildaufbaus des angezeigten Monitorbilds ermittelt und kann dann in der Auswertung berücksichtigt werden. Ein solches System ist aufgrund der Nutzung eines Monitorbilds zur Synchronisation nur für Laboruntersuchungen von Kameras mit einer geringen Aufnahme Frequenz einsetzbar.

Der Einsatz von Crashuhren zur Synchronisation ist in der Bildsequenzauswertung jedoch sehr aufwändig, da die auf der Crashuhr dargestellten Zeiten exakt bestimmt und den jeweiligen Bildern zugeordnet werden müssen. Ein weiterer Nachteil des Systems ist die Tatsache, dass die Crashuhr im Sichtfeld der Kameras stehen muss und somit einen Teil der nutzbaren Sensorfläche der jeweiligen Kamera belegt.

2.3.3.3 Synchronometer

Eine Weiterentwicklung der konventionellen Crashuhr ist das so genannte Synchronometer. Dieses Synchronometer ist in Abbildung 2-8 dargestellt und wurde speziell für die automatische Auswertung mit Verfahren der digitalen Bildverarbeitung konzipiert. Anstelle der beiden Anzeigefelder der Crashuhr wird für die Darstellung der aktuellen Systemzeit ein LED-Feld genutzt. Anhand der gerade aktiven LEDs kann der exakte Start- und Endzeitpunkt der Belichtung eines jeweiligen Bilds der Sequenz ermittelt werden. Dadurch können nicht nur Asynchronitäten zwischen den Kameras sondern auch Variationen in der Aufnahme Frequenz sowie der Belichtungszeit einer einzelnen Kamera gemessen werden.



Abbildung 2-8: Synchronometer (IES 2006)

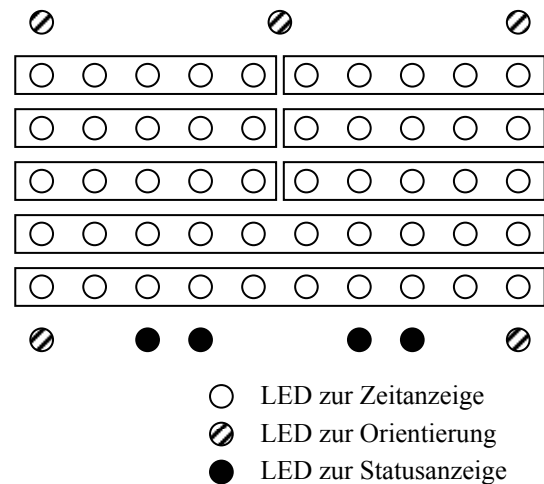


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung des Anzeigefelds des Synchronometers

Das Anzeigefeld des Synchronometers (siehe Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9) besteht aus fünf LED-Zeilen mit jeweils zehn LEDs zur Zeitanzeige, vier weiteren LEDs zur Statusanzeige im unteren Bereich des Anzeigefelds und fünf um das Anzeigefeld verteilten LEDs, die zur automatischen Bestimmung der Position und Orientierung des Synchronometers im Bild verwendet werden. Nach der Aktivierung des Synchronometers werden die LEDs in den fünf Zeilen je nach ausgewähltem Anzeigemodus nach einem bestimmten Schema nacheinander einzeln aktiviert. Die LED-Zeilen des Synchronometers sind nochmals in acht Bereiche unterteilt (siehe Rechtecke in Abbildung 2-9), in denen die Leuchtdauer der LEDs je nach ausgewähltem Modus unterschiedlich lang ist. Dadurch können unterschiedliche zeitliche Auflösungen der Anzeige realisiert werden. Details zur Leuchtdauer der LEDs in den einzelnen Bereichen bei den jeweiligen Anzeigemodi sind IES (2006) zu entnehmen.

Anhand der aktiven LEDs in den fünf Zeilen des Anzeigefelds kann im Weiteren der exakte Zeitpunkt der Aufnahme bestimmt werden. Da die Leuchtdauer der LEDs in der Regel deutlich kürzer als die Belichtungszeit ist, entsteht der Eindruck, dass zum Zeitpunkt der Bildaufnahme mehrere LEDs aktiv waren, die jedoch nacheinander während der Belichtung des Bilds aktiviert wurden. Dadurch kann der exakte Start- und Endzeitpunkt der Belichtung des jeweiligen Bilds der Sequenz ermittelt werden. Die Toleranz der Zeitbasis des internen Quarzes des Synchronometers ist mit ± 2 ppm angegeben (IES 2006). Das bedeutet, dass nach einer Anzeigedauer von einer Sekunde ein Zeitversatz von ± 2 μ s auftreten kann.

Ebenso wie auch beim Einsatz einer Crashuhr wird bei der anschließenden Auswertung zwischen den Messwerten in den asynchron aufgenommenen Sequenzen entsprechend der ermittelten Asynchronität interpoliert, wodurch je nach Interpolationsmethode geringe Unterschiede bei der Objektkoordinatenbestimmung entstehen können.

Analog zum Einsatz einer Crashuhr besteht ein Vorteil des Synchronometers in der Tatsache, dass es nicht mit den Kameras verbunden werden muss. Der Vorteil des Synchronometers gegenüber einer herkömmlichen Crashuhr liegt in der automatisierbaren Auswertung der angezeigten Systemzeit und der daraus abgeleiteten Asynchronität. Einziger Nachteil ist, dass das Synchronometer ebenso wie die konventionelle Crashuhr im Sichtfeld der Kameras stehen muss und so ein Teil der nutzbaren Sensorfläche der Kamera belegt wird.

Eine Variante dieses Verfahrens beschreiben LITOS et al. (2006). Dabei sind die Kameras alle über ein Netzwerk mit einem zentralen Rechner verbunden, der die synchrone Aufnahme aller Kameras steuert. Die Kameras nehmen kontinuierlich ein LED-Anzeigefeld auf und aus diesen Aufnahmen wird im Rechner direkt während der Aufnahme die Asynchronität bestimmt. Die aufgrund der ermittelten Asynchronität notwendige Korrektur wird durch eine verzögerte Übertragung des Synchronisationssignals zu der jeweiligen Kamera erzielt. Der Rechner synchronisiert die Kameras somit zur Laufzeit und ermöglicht die Aufnahme synchroner Bildsequenzen. Aus diesem Grund könnte das Verfahren

auch der Gruppe der Trigger-Systeme zugeordnet werden (siehe Abschnitt 2.3.2.1). Da jedoch neben der Hardware bei diesem Verfahren auch Software zur Synchronisation benötigt wird, wird dieses Verfahren als Sonderfall der Gruppe der kombinierten Synchronisationsverfahren zugeordnet.

2.3.4 Synchronisation durch Software

Die dritte Gruppe der Synchronisationsverfahren nutzt ausschließlich Software-Methoden um die asynchron erfassten Bildsequenzen zu synchronisieren. Bei den Methoden dieser Gruppe müssen die Kameras nicht mit einem Referenz-Zeitsystem verbunden werden. Es werden auch keine speziellen Hardware-Komponenten benötigt, die entweder in den Strahlengang der Kamera integriert oder im Messvolumen positioniert werden müssen. Die Berechnung und Berücksichtigung der Asynchronität erfolgt bei den softwarebasierten Synchronisationsverfahren im Rahmen der Auswertung zur Bestimmung der Objektkoordinaten. Bei einigen dieser Verfahren wird die zeitliche Zuordnung allerdings getrennt von der räumlichen Zuordnung in einem separaten vorgeschalteten Auswerteschritt durchgeführt.

Die spatio-temporale Auswertung von zwei Sequenzen S und S' erfolgt bei den in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Verfahren allgemein nach dem folgenden Schema. Die Sequenz S stellt bei der folgenden Beschreibung die Referenzsequenz dar. Die Pixel in den einzelnen Bildern der Sequenzen werden als spatio-temporale Voxel $\vec{x} = (x, y, t)^T$, also als Pixel zu einem bestimmten Zeitpunkt, betrachtet.

Die Parameter der spatio-temporalen Transformation zwischen den beiden Sequenzen werden allgemein wie folgt beschrieben:

$$\vec{P} = (\vec{P}_{spatial}, \vec{P}_{temporal}) \quad (2.3)$$

mit

$\vec{P}$	: Parameter der spatio-temporalen Transformation
$\vec{P}_{spatial}$	: Parameter der räumlichen Transformation
$\vec{P}_{temporal}$	: Parameter der zeitlichen Transformation

Für die räumliche Transformation $\vec{P}_{spatial}$ zwischen einem Voxel $\vec{x}$ der Referenzsequenz und einem Voxel $\vec{x}'$ der zu synchronisierenden Sequenz werden verschiedene Verfahren, wie z.B. die affine Transformation, die Homographie H oder die Fundamentalmatrix F (HARTLEY & ZISSERMANN 2003) genutzt. Eine affine Transformation ist eine vereinfachte Homographie, bei der nach der Transformation die Parallelität und Längenverhältnisse erhalten bleiben. Die Grundgleichungen für die Homographie und die Fundamentalmatrix lauten:

$$\vec{x}' = H \cdot \vec{x} \quad (2.4)$$

oder

$$\vec{x}' \cdot F \cdot \vec{x} = 0 \quad (2.5)$$

mit

$\vec{x}$	: Voxel der Referenzsequenz
$\vec{x}'$	: Voxel der zu synchronisierenden Sequenz
H	: Homographie
F	: Fundamentalmatrix

Die zeitliche Transformation erfolgt im einfachsten Fall über einen konstanten Zeitversatz. Im Allgemeinen wird für die zeitliche Transformation zwischen den Sequenzen jedoch eine lineare Funktion gewählt:

$$t' = \Delta t + s \cdot t \quad (2.6)$$

mit

t	: Zeitpunkt der Bildaufnahme in der Referenzsequenz
t'	: Zeitpunkt der Bildaufnahme in der zu synchronisierenden Sequenz
Δt	: Konstanter Zeitversatz
s	: Zeitliche Drift

Der Unterschied zwischen dem Zeitpunkt der Bildaufnahme in der Referenzsequenz t und dem Zeitpunkt der Bildaufnahme in der zu synchronisierenden Sequenz t' ist die gesuchte Asynchronität, die bei der Modellierung über eine lineare Funktion durch die beiden Parameter Δt und s beschrieben wird.

Für die Betrachtung der räumlichen Transformationen werden die Pixelkoordinaten des Voxels $\vec{x} = (x, y, t)^T$ als homogene Koordinaten $\vec{p}(t) = (x, y, 1)^T$ dargestellt und zusammen mit den Parametern der zeitlichen Transformation in die Grundgleichungen der Homographie H (siehe Formel (2.4)) oder der Fundamentalmatrix F (siehe Formel (2.5)) integriert. Dadurch ergeben sich folgenden Gleichungen für die spatio-temporale Transformation:

$$\vec{x}' = H \cdot \vec{x} \quad \Rightarrow \quad \vec{p}'(\Delta t + s \cdot t) = H \cdot \vec{p}(t) \quad (2.7)$$

oder

$$\vec{x}' \cdot F \cdot \vec{x} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{p}'(\Delta t + s \cdot t) \cdot F \cdot \vec{p}(t) = 0 \quad (2.8)$$

Die Parameter der spatio-temporalen Transformation sind die neun Elemente der Homographie $H (h_{11}, h_{12}, \dots, h_{33})$ bzw. die der Fundamentalmatrix $F (f_{11}, f_{12}, \dots, f_{33})$ für die räumliche Transformation und die entsprechenden Parameter der zeitlichen Transformation.

$$\begin{aligned} \vec{P}_{spatial} &= [h_{11} \ h_{12} \ h_{13} \ h_{21} \ h_{22} \ h_{23} \ h_{31} \ h_{32} \ h_{33}] & \text{bzw.} & \quad \vec{P}_{spatial} = [f_{11} \ f_{12} \ f_{13} \ f_{21} \ f_{22} \ f_{23} \ f_{31} \ f_{32} \ f_{33}] \\ \vec{P}_{temporal} &= [\Delta t \ s] & & \quad \vec{P}_{temporal} = [\Delta t \ s] \end{aligned} \quad (2.9)$$

Die Bestimmung der optimalen Parameter der spatio-temporalen Transformation erfolgt z.B. über die Minimierung des Restfehlers der spatio-temporalen Transformation zwischen den Bildern der beiden Sequenzen:

$$err(\vec{P}) = \sum d(\vec{p}(t), \vec{p}'(t')) \quad (2.10)$$

mit

$err(\vec{P})$	: Restfehler der spatio-temporalen Transformation
$d(\vec{p}(t), \vec{p}'(t'))$	: Abstandsfunktion für die Bestimmung der jeweiligen Restfehler

Je nachdem ob eine Homographie oder eine Fundamentalmatrix für die räumliche Transformation verwendet wird, wird eine andere Abstandfunktion genutzt. Bei der Verwendung einer Homographie wird der Abstand zwischen den homogenen Voxeln bestimmt und bei der Verwendung einer Fundamentalmatrix wird der Abstand zwischen dem Voxel und der zugehörigen Epipolarlinie ermittelt.

$$d(\vec{p}(t), \vec{p}'(t')) = \text{dist}_H(H \cdot \vec{p}(t), \vec{p}'(\Delta t + s \cdot t)) \quad \text{bzw.} \quad d(\vec{p}(t), \vec{p}'(t')) = \text{dist}_F(F \cdot \vec{p}(t), \vec{p}'(\Delta t + s \cdot t)) \quad (2.11)$$

mit

$\text{dist}_H(\dots)$: Abstand zwischen homogenen Voxel (Homographie)
 $\text{dist}_F(\dots)$: Abstand zwischen dem Voxel und der zugehörigen Epipolarlinie (Fundamentalmatrix)

Die optimalen Parameter der spatio-temporalen Transformation und somit die größte Ähnlichkeit zwischen den Bildern der beiden Sequenzen liegen dann vor, wenn der Restfehler der spatio-temporalen Transformation $\text{err}(\vec{P})$ am kleinsten ist.

Die Gruppe der softwarebasierten Verfahren lässt sich nach LEI & YANG (2005) in drei Untergruppen unterteilen. Die Unterteilung beruht auf den Informationen, die für die Bestimmung der Asynchronität aus den Bildsequenzen abgeleitet werden. Die erste Untergruppe beinhaltet Verfahren, die unter dem Begriff grauwertbasierte Verfahren oder direkte Verfahren zusammengefasst werden. Diese nutzen die Grauwerte der jeweiligen Bilder direkt zur Bestimmung der Asynchronität. Die Verfahren der zweiten Untergruppe werden als merkmalsbasierte Verfahren bezeichnet und verwenden für die Bestimmung der Asynchronität aus den Bildern extrahierter Merkmale. Die dritte Untergruppe enthält Verfahren, die die Asynchronität über die Parameter der Kamerabewegungen ermitteln. Die drei Untergruppen der softwarebasierten Verfahren werden im Weiteren detailliert beschrieben und bewertet.

2.3.4.1 Grauwertbasierte Verfahren

Die Untergruppe der grauwertbasierten Verfahren nutzt zur Bestimmung der Parameter der spatio-temporalen Transformation zwischen den Einzelbildern der Sequenzen alle Grauwerte der jeweiligen Bilder. Der Vorteil dieser Verfahren liegt in der Tatsache, dass durch die Nutzung aller Pixel der Bilder die maximale Anzahl an Werten für die Auswertung zur Verfügung steht. Diese Verfahren werden in der Literatur auch als *sequence-to-sequence alignment* bezeichnet.

In seiner ursprünglichen Form haben die grauwertbasierten Verfahren den Nachteil, dass sie sehr empfindlich gegenüber Helligkeitsunterschieden der Objektraumscene zwischen den Bildsequenzen sind. Dieser Nachteil kann jedoch, ebenso wie bei der Kreuzkorrelation, durch die Ausnutzung von normierten Zuordnungsoperatoren weitgehend beseitigt werden. Dabei werden die Grauwertunterschiede in den einzelnen Bildern, die für die Zuordnung genutzt werden sollen, zunächst innerhalb eines Suchfensters normiert. Dadurch werden die Unterschiede in der Helligkeit deutlich verringert.

CASPI & IRANI (2000) stellen ein grauwertbasiertes Verfahren vor, bei dem aus Bildsequenzen von zwei stationären Kameras in einer simultanen Auswertung die räumliche und die zeitliche Zuordnung bestimmt wird. Bei diesem Verfahren werden neben Objektbewegungen auch Veränderungen in der Helligkeitsverteilung der Szene zur Bestimmung der Asynchronität genutzt. Für die Bestimmung der optimalen Parameter der spatio-temporalen Transformation wird hier die Summe der quadrierten Differenzen $SSD(\vec{P})$ (*sum of squared differences*) zwischen den Grauwerten der jeweiligen Bildern der beiden Sequenzen genutzt.

$$SSD(\vec{P}) = \sum \left(d(\vec{p}(t), \vec{p}'(t')) \right)^2 \quad (2.12)$$

Eine ausführliche Beschreibung der grauwertbasierten Verfahren, speziell im Vergleich zu den merkmalsbasierten Verfahren geben IRANI & ANANDAN (2000).

2.3.4.2 Merkmalsbasierte Verfahren

Bei den merkmalsbasierten Verfahren werden in einem ersten Schritt Merkmale, die für die spatio-temporale Transformation verwendet werden sollen, in den Bildern detektiert. Zur Vereinfachung wird bei den meisten Verfahren dafür zunächst der statische Hintergrund der Objektraumszene durch Subtraktion des jeweils nachfolgenden Bilds eliminiert. Im Anschluss werden die einzelnen detektierten Merkmale über die Sequenz verfolgt. Die Zuordnung der Merkmale zwischen den einzelnen Sequenzen erfolgt in einem weiteren Auswerteschritt.

Nach der Merkmalszuordnung werden die Bedingungen für die Modellierung der Asynchronität und die räumliche Transformation zwischen den Sequenzen aufgestellt (siehe Formel (2.7) und (2.8)). Die Messwerte $\vec{p}(t) = (x, y, 1)^T$ sind hier jedoch nicht alle Grauwerte des Bilds, die als homogene Koordinaten eines Voxels in die Gleichungen eingehen, sondern die Koordinaten des Merkmals, wie z.B. die Mittelpunktskoordinaten einer Zielmarke. Die Bewertung der spatio-temporalen Transformation erfolgt ebenfalls über die Minimierung des Restfehlers (siehe Formel (2.10)).

In den Ansätzen der merkmalsbasierten Verfahren werden unterschiedliche Merkmale für die Zuordnung genutzt. Die einfachste Form der Merkmale ist der Punkt. In STEIN (1998) und LEE et al. (2000) werden für die Zuordnung mehrere Punkte in den jeweiligen Bildern der Sequenzen simultan genutzt. Die Informationen aus der Verfolgung der Punkte über die Sequenz oder die Verteilung der Punkte im Bild wird jedoch nicht herangezogen. Die Punkte werden bei diesem Verfahren getrennt voneinander als unabhängige Merkmale oder als eine ungeordnete Sammlung von Punkten, betrachtet.

In (CASPI et al. 2002, KUTHIRUMMAL et al. 2002, WOLF & ZOMET 2002a, POOLEY et al. 2003, RAO et al. 2003, TRESADERN & REID 2003, ZHOU & TAO 2003, CARCERONI et al. 2004, TRESADERN & REID 2004, TUYTELAARS & VAN GOOL 2004, WEDGE et al. 2006) werden anstelle der Punkte die Trajektorien der Punkte in den Bildern der Sequenz genutzt. Die zusätzliche Information durch die Verwendung der Trajektorien kann sowohl für die zeitliche als auch für die räumliche Zuordnung genutzt werden und vereinfacht die spatio-temporale Transformation von Sequenzen wesentlich. Die Bewertung der Ähnlichkeit der Trajektorien erfolgt nach dem gleichen Grundprinzip wie bei einzelnen Punkten (siehe Formel (2.10)). Anhand der folgenden beiden schematischen Darstellungen werden die Vorteile der Ausnutzung der zusätzlichen Information von Trajektorien gegenüber Punkten für die spatio-temporale Transformation vereinfacht aufgezeigt.

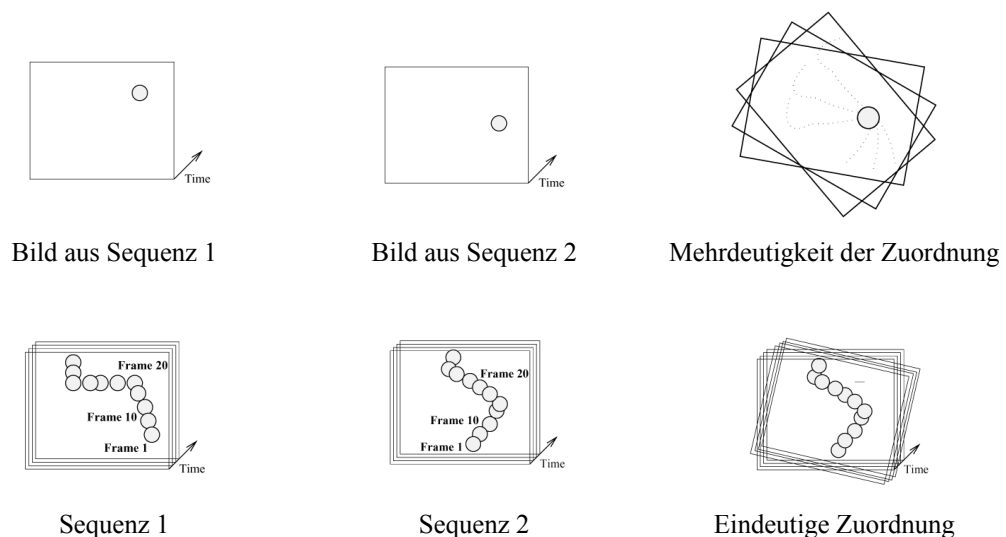


Abbildung 2-10: Zuordnung von Bildern aus zwei Sequenzen, oben: über einen einzelnen Punkt, unten: über die Trajektorie eines Punkts (CASPI & IRANI 2000, verändert)

In Abbildung 2-10 wird der Vorteil einer räumlichen Zuordnung über eine Trajektorie gegenüber einem einzelnen Punkt schematisch dargestellt. Anhand des Punkts kann die räumliche Zuordnung der beiden Bilder, in diesem Fall die Rotation in der Bildebene im oberen Teil der Abbildung 2-10 nicht eindeutig bestimmt werden. Eine eindeutige

zeitliche Zuordnung ist über einen einzelnen Punkt ebenfalls nicht möglich. Die räumliche und auch die zeitliche Zuordnung über eine einzige Trajektorie ist hingegen eindeutig (siehe unteren Teil der Abbildung 2-10) solange sie eine bestimmte Länge hat und keine Gerade oder eine andere symmetrische Bewegung, wie z.B. einen Kreis, beschreibt.

Eine spatio-temporale Transformation über mehr als einen einzelnen Punkt ist wesentlich stabiler, jedoch nicht immer eindeutig. Im linken Teil der Abbildung 2-11 sind fünf Punkte dargestellt, die aufgrund ihrer symmetrischen Verteilung im Bild nicht eindeutig einander zugeordnet werden können. Durch die Ausnutzung der zusätzlichen Information der jeweiligen Trajektorien im Bild (siehe rechten Teil der Abbildung 2-11) der einzelnen Punkte wird die Zuordnung wesentlich vereinfacht.

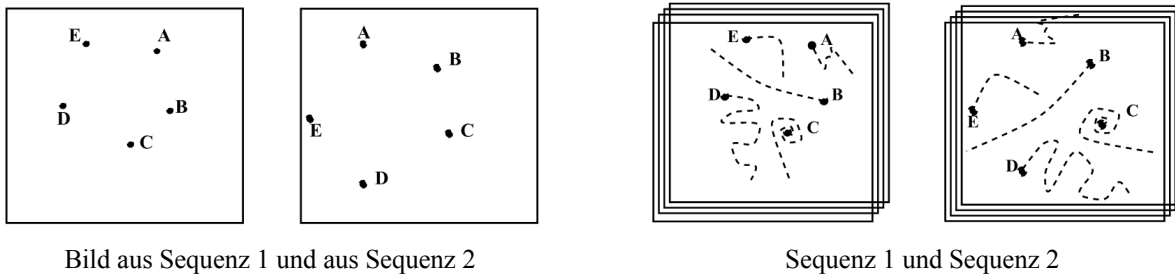


Abbildung 2-11: Zuordnung von Bildern aus zwei Sequenzen, links: über die Verteilung von fünf Punkten, rechts: über die Trajektorien der fünf Punkte (CASPI & IRANI 2000, verändert)

YAN & POLLEFEYS (2004) beschreiben ein alternatives Verfahren zur zeitlichen Zuordnung von Sequenzen, bei der statt einzelner Punkte oder Trajektorien die Anzahl von so genannten *space-time interest points* in den jeweiligen Bildern der Sequenz als Merkmal angesehen wird. Diese *space-time interest points* repräsentieren besondere Ereignisse in den Bildern der Sequenz wie z.B. das Erscheinen oder Verschwinden eines Objekts oder einen Wechsel in der Objektbewegung. Die Anzahl dieser Ereignisse ist das Merkmal für das jeweilige Bild und aus der Abfolge der Bilder ergibt sich ein spezieller Verlauf der jeweiligen Anzahl der *space-time interest points* über die Sequenz. Die zeitliche Zuordnung erfolgt durch den Vergleich der Verläufe der *space-time interest points* der Sequenzen. Dadurch muss nicht jeder Punkt oder jede Trajektorie der einen Sequenz einem Punkt oder einer Trajektorie der anderen Sequenz zugeordnet werden. Die Bewertung der Ähnlichkeit der beiden Verläufe erfolgt bei diesem Verfahren durch einen Korrelationskoeffizienten für jede mögliche zeitliche Verschiebung zwischen den Sequenzen. Der Zeitpunkt, an dem der maximale Korrelationskoeffizient auftritt repräsentiert die optimale zeitliche Zuordnung.

In WHITEHEAD et al. (2005) wird ein Verfahren erläutert, bei dem für die spatio-temporale Transformation nicht alle Punktmessungen einer Trajektorie genutzt werden. Die Trajektorie wird stattdessen in Segmente, je nach Krümmung der Trajektorie, unterteilt. Durch den Vergleich der Abfolge von den verschiedenen Krümmungen wird die zeitliche Zuordnung der Bilder aus den Sequenzen realisiert. Die räumliche Transformation erfolgt über den Trifocal-Tensor (HARTLEY & ZISSERMANN 2003). Bei diesem Verfahren werden allerdings spezielle Anforderungen an die Form der Trajektorien gestellt: Die Trajektorien dürfen nicht über die gesamte Länge mit der gleichen Krümmung verlaufen oder einen anderen symmetrischen Verlauf aufzeigen.

Eine andere Variante der spatio-temporalen Transformation von Bildsequenzen beschreiben SINHA & POLLEFEYS (2004), bei der umhüllende Polygone von im Bild dargestellten Objekten, wie z.B. einem Sportler, genutzt werden. Die Tangenten an den Rändern des Objekts im Bild, die die Umhüllende des abgebildeten Objekts bilden, werden dabei als Merkmale für die spatio-temporale Transformation genutzt. Die Bewertung erfolgt durch den Vergleich aller Tangenten der jeweiligen Umhüllenden in den Einzelbildern der Sequenzen.

Bei dem in LEI & Yang (2005) beschriebenen Verfahren werden anstelle von Punkten Linien für die Bestimmung der Asynchronität genutzt. Daher müssen bei diesem Verfahren stets Gruppen von drei Bildsequenzen ausgewertet werden. Die räumliche Transformation erfolgt hier über den Trifocal-Tensor. Sollen mehr als drei Sequenzen analysiert werden,

werden verschiedene Kombinationen aus jeweils drei Sequenzen gebildet und ausgewertet. Die Ergebnisse aller Auswertungen werden anschließend kombiniert.

Bei allen bisher aufgeführten merkmalsbasierten Verfahren erfolgt die räumliche Transformation zwischen den Bildsequenzen über lineare Verfahren, wie die Homographie, die Fundamentalmatrix oder den Trifocal-Tensor. Die räumliche Transformation von zwei Bildern über eine Homographie liefert jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen exakte Ergebnisse: Entweder müssen die beiden Sequenzen von einem Standpunkt aus aufgenommen werden, sich alle Objektpunkte im Unendlichen befinden oder alle Objektpunkte in einer Ebene liegen. Die ersten beiden Voraussetzungen sind jedoch nur theoretisch realisierbar, sodass eine Homographie meist dann eingesetzt wird, wenn sich alle Objektpunkte in einer Ebene befinden. Befinden sich die Objektpunkte nicht in einer Ebene im Raum, treten also zwischen den Objektpunkten größere Tiefenvariation auf, wird statt der Homographie die Fundamentalmatrix für die räumliche Transformation genutzt. Der Trifocal-Tensor ist eine Erweiterung für eine lineare räumliche Transformation von drei Bildsequenzen. Der Vorteil der Homographie, der Fundamentalmatrix und des Trifocal-Tensors gegenüber einer Bündelausgleichung ist, dass es sich bei diesen Verfahren um lineare Verfahren handelt, die keine Näherungswerte benötigen.

Aufgrund der Verwendung linearer räumlicher Transformationen sind die Ansätze jedoch auf zwei oder drei Kameras beschränkt. Die Auswertung von größeren Aufnahmeverbänden kann bei diesen Verfahren nicht in einer gemeinsamen Auswertung erfolgen, sondern nur jeweils in Gruppen von zwei oder drei Kameras.

Des Weiteren besitzen die meisten beschriebenen merkmalsbasierten Verfahren aufgrund der Voraussetzung, dass nur eine Parametersatz für die räumliche Transformation genutzt werden kann, Einschränkungen bezüglich der Kameraposition, sodass nur Sequenzen von statischen Kamerapositionen ausgewertet werden können. Eine Variation in den Kamerapositionen relativ zueinander kann somit nicht berücksichtigt werden und führt bei diesen Verfahren zu fehlerhaften Ergebnissen.

Die Modellierung der Asynchronität erfolgt im Allgemeinen bei den aufgeführten merkmalsbasierten Verfahren durch eine konstante oder eine lineare Funktion. Bei manchen Verfahren kann jedoch nur eine Asynchronität in Form von ganzen Bildern bzw. vorgegebenen Zeitschritten der Sequenz berücksichtigt werden, da diese Verfahren die Asynchronität nicht im Rahmen der Auswertung berechnen, sondern in einem vorher definierten Bereich variieren, mit jeder variierten Asynchronität eine Auswertung durchführen und das beste Ergebnis auswählen. Bei manchen dieser Ansätze kann die Asynchronität nicht ohne weiteres auf z.B. einen linearen Ansatz erweitert werden.

In Tabelle 2-1 sind die jeweiligen Eigenschaften der merkmalsbasierten Software-Verfahren, wie die Art der Kamerapositionsbestimmung, die maximale Anzahl der gemeinsam auswertbaren Kameras, die Modellierung der Asynchronität und die angewandte räumliche Transformation zusammengefasst.

Verfahren	Merkmal	Kamera- position	Maximale Anzahl Kameras	Modellierung der Asynchronität	Räumliche Transformation
STEIN 1998	Punkt	statisch	2	konstant (ganzzahlig)	Homographie
LEE et al. 2000	Punkt	statisch	2	konstant (ganzzahlig)	Homographie
CASPI et al. 2002	Trajektorie	statisch	2	linear	Fundamental- matrix
KUTHIRUMMAL et al. 2002	Trajektorie	statisch	3	konstant	Trifocal-Tensor
WOLF & ZOMET 2002a	Trajektorie	statisch	2	linear	Affine Transformation
POOLEY et al. 2003	Trajektorie	dynamisch	2	linear	Fundamental- matrix
RAO et al. 2003	Trajektorie	statisch	2	nicht lineare Funktion	Fundamental- matrix
TRESADERN & REID 2003	Trajektorie	statisch	2	linear	Affine Transformation
ZHOU & TAO 2003	Trajektorie	statisch	2	konstant	Affine Transformation
CARCERONI et al. 2004	Trajektorie	statisch	2	linear	Fundamental- matrix
TRESADERN & REID 2004	Trajektorie	statisch	2	linear	Bündel- ausgleichung
TUYTELAARS & VAN GOOL 2004	Trajektorie	dynamisch	2	linear	Affine Transformation
WEDGE et al. 2006	Trajektorie	statisch	2	linear	Fundamental- matrix
YAN & POLLEFEYS 2004	Anzahl <i>space-time</i> <i>interest points</i> im Bild	statisch	2	konstant (ganzzahlig)	-
WHITEHEAD et al. 2005	Krümmungen der Trajektorie	statisch	3	linear	Trifocal-Tensor
SINHA & POLLEFEYS 2004	Objektumhüllende durch Tangenten	statisch	2	konstant	Fundamental- matrix
LEI & Yang 2005	Linien	dynamisch	3	linear	Trifocal-Tensor

Tabelle 2-1: Zusammenstellung der Eigenschaften der merkmalsbasierten Software-Verfahren zur Synchronisation von Bildsequenzen

Generell haben die merkmalsbasierten Verfahren den Vorteil, dass sie unabhängiger gegenüber Helligkeitsschwankungen sind als die grauwertbasierten Verfahren, da sie nicht mit den originären Grauwerten arbeiten, sondern mit abgeleiteten Merkmalen. Durch die Nutzung von Merkmalen für die spatio-temporale Transformation können bei diesen Verfahren Mehrdeutigkeiten entstehen. Diese treten dann auf, wenn sich die Merkmale in Form und Struktur sehr stark ähneln oder Symmetrien aufweisen, wie z.B. eine Trajektorie, die eine Kreisbahn oder eine Gerade beschreibt. Die Mehrdeutigkeiten, die bei der spatio-temporalen Transformation ausschließlich über Trajektorien entstehen können, sind vereinfacht in Abbildung 2-12 dargestellt.

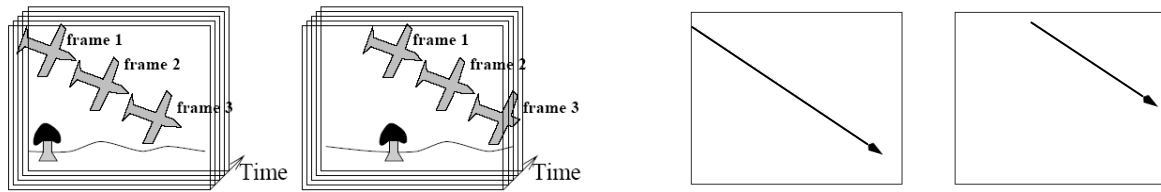


Abbildung 2-12: Mehrdeutigkeiten bei der spatio-temporalen Transformation ausschließlich über Trajektorien, links: Bilder der beiden Sequenzen, rechts: Trajektorie des Flugzeugs als detektiertes Merkmal (CASPI & IRANI 2000, verändert)

Wird bei den beiden in Abbildung 2-12 gezeigten Sequenzen nur das im linken Teil der Abbildung dargestellte Flugzeug als Merkmal detektiert und verfolgt, kommt er zu Mehrdeutigkeiten bei der spatio-temporalen Transformation. Die Trajektorien des Flugzeugs beschreiben eine Gerade, über die hier die spatio-temporale Transformation nicht eindeutig erfolgen kann (siehe rechter Teil der Abbildung 2-12). Wird dagegen zusätzlich noch der Baum als statisches Merkmal detektiert, kann die spatio-temporale Transformation eindeutig bestimmt werden.

Eine detaillierte Beschreibung der merkmalsbasierten Verfahren im Vergleich zu den grauwertbasierten Verfahren geben TORR & ZISSERMANN (2000).

2.3.4.3 Kamerabewegungsbasierte Verfahren

Bei der dritten Untergruppe der softwarebasierten Synchronisationsverfahren werden stets zwei fest miteinander verbundene, sich bewegende Kameras eingesetzt. Die Orientierung der Kameras relativ zueinander ist für die gesamte Aufnahmedauer konstant. Bei diesen kamerabewegungsbasierten Verfahren werden weder Grauwerte noch Merkmale in den Bildern für die spatio-temporale Transformation verwendet. Stattdessen werden die Parameter der Transformationen von einem Bild der Sequenz zum nächsten innerhalb der jeweiligen Sequenz genutzt. Die spatio-temporale Transformation erfolgt dann durch den Vergleich der jeweiligen Transformationsparameter. Die korrekte Zuordnung ist zu dem Zeitpunkt der Sequenz gegeben, an dem die Transformationsparameter zwischen den aufeinander folgenden Bildern der beiden Sequenzen identisch sind bzw. die geringsten Unterschiede aufzeigen. Diese geschieht durch die Bestimmung des maximalen Korrelationskoeffizienten. Eine allgemeine Voraussetzung für die kamerabewegungsbasierten Verfahren ist, dass die Kamerabewegung nicht konstant sein darf, da ansonsten alle Transformationsparameter zwischen aufeinander folgenden Bildern der Sequenz gleich sind und somit keine eindeutige Zuordnung erfolgen kann.

Bei der von CASPI & IRANI (2001) beschriebenen Variante dieser Verfahren werden Sequenzen ausgewertet die einander nicht überlappen. Bei diesem Verfahren wird vorausgesetzt, dass die Kameras im Bezug zur Aufnahmeentfernung eine geringe Basis besitzen oder die Objektraumszene eine Ebene beschreibt. Aufgrund der nicht überlappenden Bilder muss die Objektraumszene statisch sein, da ansonsten die Objektbewegungen nicht eindeutig von den Kamerabewegungen getrennt werden können und dadurch das Zuordnungskriterium zur Bestimmung der Asynchronität, die Transformationsparameter von Bild zu Bild einer Sequenz, nicht korrekt bestimmt werden können.

WOLF & ZOMET (2002b) beschreiben eine weitere Variante der kamerabewegungsbasierten Verfahren bei der ein vorher definierter Zeitbereich zur Bestimmung der korrekten Asynchronität sukzessive getestet wird. Für die räumliche Zuordnung wird eine Homographie genutzt. Die Festlegung der Asynchronität und somit die Zuordnung zwischen den Sequenzen erfolgt durch die Auswahl des Auswertungsergebnisses bei dem die kleinsten Restklaffungen bei der Transformation zwischen den jeweiligen Bildern der Sequenzen auftreten.

In SPENCER & SHAH (2004) wird eine Variante beschrieben, bei der für die spatio-temporale Transformation eine Fundamentalmatrix genutzt wird, sodass die Objektraumszene nicht eben sein muss. Durch die Auswahl gleicher Fundamentalmatrizen für die Transformation zwischen aufeinander folgenden Bildern einer Sequenz wird die korrekte

Zuordnung bestimmt. Im Vorfeld wird dazu ein Bereich für die Asynchronität definiert und alle möglichen Asynchronitäten innerhalb dieses Bereichs werden sukzessive ausgewertet, d.h. die Asynchronität wird in Schritten einer vorgegebenen Schrittweite variiert und analysiert. Die Konstellation, die die geringsten Unterschiede in den Parametern der Fundamentalmatrix aufweist, wird als korrekt angenommen.

2.4 Zusammenfassung

Das zu entwickelnde Verfahren soll für Anwendungen konzipiert werden, bei denen keine Hardware-Komponenten zur Synchronisation der Bildsequenzen eingesetzt werden. Somit kommen hardwarebasierte Verfahren und die Verfahren mit einer Kombination aus Hardware und Software für den Einsatz nicht in Frage. Jedoch stellen diese Verfahren aufgrund der hohen erreichbaren Genauigkeit die Referenz für die Validierung des neuen Verfahrens zur Bildsequenzauswertung dar.

Die Verfahren der drei Untergruppen der softwarebasierten Verfahren stellen bestimmte Voraussetzungen an die Aufnahme der Bildsequenzen. Die grauwertbasierten Verfahren haben den Nachteil, dass für die räumliche und zeitliche Zuordnung eine ausreichende Textur notwendig ist und, dass die Aufnahmen der Bildsequenzen keinen allzu großen Konvergenzwinkel aufweisen dürfen. Die Verfahren der dritten Untergruppe, die die Bewegung eines fest miteinander verbundenen Kamerapaars zur Bestimmung der Asynchronität nutzen, sind für das vorliegende Anwendungsgebiet aufgrund der Forderung nach möglichst kurzer Basislänge zwischen den Kameras und der festen Verbindung zwischen den Kameras nicht praktikabel einsetzbar.

2.4.1 Bewertung der merkmalsbasierten Verfahren

Die vorgestellten merkmalsbasierten Verfahren bilden die Grundlage für die Entwicklung des neuen Verfahrens. Jedoch sind sie in den beschriebenen Versionen nicht auf die Anwendung bei der photogrammetrischen Bildsequenzauswertung übertragbar, da sie prinzipielle Einschränkungen aufweisen: Die Auswertung erfolgt bei einigen Verfahren als zweistufiges Verfahren, d.h. die räumliche Transformation erfolgt getrennt von der zeitlichen Transformation. Diese beiden Auswerteschritte werden meist iterativ durchlaufen. Allgemein müssten zwar die gleichen Ergebnisse bei einer getrennten räumlichen und zeitlichen Transformation sowie bei einer simultanen spatio-temporalen Transformation erzielt werden. Dies gilt jedoch nur, wenn keine Korrelationen zwischen den Parametern der räumlichen und zeitlichen Transformation existieren. Ist dies der Fall müssen die beiden Auswerteschritte zusammen erfolgen. Ansonsten können Ungenauigkeiten in der Auswertung auftreten oder das Ausgleichungssystem kann divergieren.

Die räumlichen Transformationen in den beschriebenen merkmalsbasierten Verfahren beruhen mit der Ausnahme von TRESADERN & REID (2004) auf linearen Verfahren, wie der Homographie, der Fundamentalmatrix oder dem Trifocal-Tensor. Diese Verfahren sind jedoch auf die Auswertung von zwei bzw. drei Bildsequenzen beschränkt und können nicht, wie beispielsweise die Bündelausgleichung, auf die simultane Auswertung einer beliebigen Anzahl von Sequenzen erweitert werden.

Die zeitliche Auswertung erfolgt bei den merkmalsbasierten Verfahren bis auf wenige Ausnahmen über eine lineare Funktion zur Modellierung der Asynchronität, die für die meisten Anwendungen auch ausreichend ist. Die zeitliche Zuordnung der Messungen in den Bildsequenzen erfolgt bei diesen Verfahren durch eine lineare Interpolation entlang der Trajektorie im Bildraum. Die lineare Interpolation im Bildraum setzt jedoch voraus, dass die Bewegung des Objekts parallel zur Bildebene verläuft, da sich ansonsten der Maßstab im Bild zwischen den Stützstellen ändert und eine lineare Interpolation somit zu fehlerhaften Ergebnissen führt. Diese Forderung nach einer Objektbewegung, die parallel zu allen Bildebenen verläuft, ist nicht praktikabel einsetzbar. Bei den meisten beschriebenen Verfahren wird diese Forderung in den praktischen Beispielen auch nur annähernd erfüllt und somit werden Verschlechterungen in der Genauigkeit der Ergebnisse der Auswertung in Kauf genommen.

Zusammenfassend sind bei den vorgestellten merkmalsbasierten Software-Verfahren zur Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen spezielle Voraussetzungen bezüglich der Aufnahmekonstellation oder der Anzahl der

einsetzbaren Kameras zu erfüllen. Dadurch sind die beschriebenen Verfahren nicht flexibel genug einsetzbar und können beispielsweise für die exakte Auswertung von dynamischen Versuchen, die mit einem Rundumverband erfasst werden sollen, nicht ohne weiteres eingesetzt werden.

2.4.2 Anforderungen an einen neuen Ansatz

Aus der Bewertung der aufgeführten Verfahren werden an ein neues Verfahren zur photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen folgende Anforderungen gestellt:

- Die räumliche und zeitliche Transformation soll simultan in einer gemeinsamen Bündelausgleichung erfolgen. Dadurch besteht die Möglichkeit Korrelationen zwischen den räumlichen und zeitlichen Parametern korrekt berücksichtigen zu können und eine beliebige Anzahl von Bildsequenzen simultan auswerten zu können.
- Die räumliche Transformation soll über die Trajektorien von signalisierten Punkten im Bild erfolgen. Somit können alle vorhandenen Informationen aus den Bildsequenzen genutzt werden und durch die Messung von Merkmalen ist das Verfahren robust gegenüber Helligkeitsschwankungen im Messvolumen. Durch die Nutzung extrahierter Trajektorien von signalisierten Punkten statt den originären Grauwerten dürfen die Aufnahmen auch einen größeren Konvergenzwinkel aufweisen und können somit freier im Messvolumen positioniert werden.
- Die zeitliche Transformation soll auf der Modellierung der Asynchronität über eine Funktion, die nicht auf einen konstanten Wert beschränkt ist, erfolgen. Die Nutzung einer linearen Funktion oder eines Polynoms zweiter Ordnung zur Modellierung müssen ebenso möglich sein.
- Die zeitliche Transformation der Bildsequenzen soll durch die Interpolation entlang der Trajektorie der Punkte im Objektraum erfolgen. Dadurch bestehen keine Zwänge bezüglich der Bewegungsrichtung des Objekts in Relation zur Bildebene. Die Interpolation erfolgt über einen linearen Ansatz, sodass differentiell von einer gleichförmigen Bewegung der Objektpunkte ausgegangen wird.

In der vorliegenden Arbeit werden diese Anforderungen bei der Entwicklung eines neuen Verfahrens zur photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen berücksichtigt.

3 Theorie des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität

In diesem Kapitel wird ein neues Verfahren zur dreidimensionalen photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen vorgestellt. Die Basis für die spatio-temporale Transformation bildet bei diesem Verfahren die Bündelausgleichung, die um Parameter zur Berücksichtigung der Asynchronität erweitert wird.

Nach der Beschreibung der Strategie der Auswertung und der Modellierung der Asynchronität wird die Integration in das funktionale Modell der Bündelausgleichung erläutert. Des Weiteren werden die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Verfahrens vorgestellt.

3.1 Strategie und Modellierung

Das neue Verfahren zur Berücksichtigung der Asynchronität ist für Anwendungen konzipiert, bei denen die Synchronisation der Kameras nicht mit Hardware-Komponenten realisiert werden kann. Daher erfolgt die Synchronisation der Bildsequenzen nicht bereits bei der Aufnahme, sondern erst im Rahmen der Bildsequenzauswertung, also über Software-Verfahren. Das neue Verfahren kann eine beliebige Anzahl von Bildsequenzen auswerten, die mit unterschiedlichen Kameratypen aufgenommen wurden.

Bei diesem Verfahren werden die Bildkoordinatenmessungen von signalisierten Zielmarken in aufeinander folgenden Bildern der Sequenz als Beobachtungen genutzt. Somit lässt es sich der Gruppe der merkmalsbasierten Software-Verfahren zuordnen.

3.1.1 Anforderungen und allgemeines Konzept

Ein zuverlässiger und robuster Algorithmus für die Bestimmung der Asynchronität im Rahmen der Bildsequenzauswertung muss folgende Versuchsbedingungen berücksichtigen (CARCERONI et al. 2004):

- unbekannte Aufnahmefrequenzen der Kameras,
- beliebige Asynchronität zwischen den Bildsequenzen,
- beliebige Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Versuchsobjekts,
- beliebige sowie unbekannte Kamerakonfiguration und
- keine Notwendigkeit für Passpunkte im Messvolumen.

Diese Anforderungen stellen, ebenso wie die in Abschnitt 2.4.2 aufgeführten Anforderungen die Randbedingungen für die Entwicklung des neuen Auswerteverfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität dar. Zur Erfüllung der oben aufgeführten Anforderungen wird die räumliche mit einer zeitlichen Transformation kombiniert und die Parameter dieser spatio-temporalen Transformation werden im Rahmen einer gemeinsamen Auswertung simultan bestimmt. Die Berücksichtigung der Asynchronität zwischen den Bildsequenzen wird dabei über eine mathematische Approximation mittels zeitlicher Korrekturfunktionen realisiert. Diese Korrekturfunktionen werden in Form eines Interpolationsfaktors in das funktionale Modell der Bündelausgleichung integriert. Der Interpolationsfaktor wird als Unbekannte betrachtet und mitgeschätzt. Das gleiche theoretische Grundprinzip der mathematischen Approximation über Korrekturfunktionen wird in der Photogrammetrie z.B. auch bei der Modellierung der Verzeichnungsparameter im Rahmen der Kamerakalibrierung genutzt (BROWN 1971).

3.1.2 Asynchronität als Komponente der Optischen Messkette

Ebenso wie andere Komponenten der Optischen Messkette ist die Asynchronität ein wichtiger Einflussfaktor für die Genauigkeit der Objektkoordinatenbestimmung im Rahmen der Bildsequenzauswertung (RAGUSE & WIGGENHAGEN 2003). Eine Asynchronität zwischen den im Aufnahmeverband genutzten Kameras gehört zu der Gruppe der zeitlichen Komponenten der Optischen Messkette. Diese zeitlichen Komponenten haben unterschiedliche physikalische Ursachen und setzen sich wie folgt zusammen:

- Genauigkeit und Stabilität der Aufnahmefrequenzen,
- Genauigkeit und Stabilität der Belichtungszeiten,
- unterschiedliche Aufnahmefrequenzen der Kameras,
- unterschiedliche Belichtungszeiten der Kameras,
- konstante oder variable Zeitunterschiede zwischen den Aufnahmen der verschiedenen Kameras und
- Bewegungen des Objekts innerhalb der Belichtungszeit (Bewegungsunschärfe).

Im Rahmen der Bildsequenzauswertung müssen die Auswirkungen aller aufgeführten zeitlichen Komponenten der Optischen Messkette für eine exakte und zuverlässige Bestimmung der Objektkoordinaten berücksichtigt werden. Die zeitlichen Komponenten werden dafür, unabhängig von den jeweiligen Ursachen, unter dem Begriff Asynchronität zusammengefasst und gemeinsam modelliert.

Die ermittelten Parameter der Asynchronität beziehen sich stets auf ein zeitliches Referenzsystem, dass vor der Auswertung festgelegt werden muss. Es kann durch eine externe Uhr oder durch eine der Kameras des Aufnahmeverbands definiert sein.

3.1.3 Modellierung der Asynchronität

Die Asynchronität wird separat für jede Kamera über eine zeitliche Korrekturfunktion modelliert, deren Parametrisierung von den Eigenschaften der jeweiligen Kamera abhängt.

Der einfachste Fall ist die Modellierung mit einem konstanten Zeit-Offset. Dieser setzt voraus, dass die Aufnahmefrequenz der eingesetzten Kamera über den gesamten Zeitbereich der Bildsequenz konstant ist und der Frequenz des Referenzsystems entspricht. Der Zeit-Offset Δt_{Offset} kann beispielsweise durch unterschiedliche Belichtungszeiten, durch unterschiedliche Signallaufzeiten zu den Kameras oder durch unterschiedliche Signalverarbeitungszeiten innerhalb der Kameras verursacht werden.

$$\Delta t(t_i) = \Delta t_{Offset} \quad (3.1)$$

mit

- $\Delta t(t_i)$: Asynchronität der Kamera zum Zeitpunkt t_i der Bildsequenz [s]
 Δt_{Offset} : Konstanter Zeit-Offset der Kamera [s]

Die Asynchronität muss über eine lineare Funktion modelliert werden, wenn die Kamera mit einer anderen Frequenz als der des Referenzsystems aufnimmt, die Aufnahmefrequenz der Kamera aber über den gesamten Zeitbereich konstant ist. Die konstante Korrekturfunktion aus Formel (3.1) wird um das Verhältnis der Aufnahmefrequenz zur Frequenz des Referenzsystems Δt_{Ratio} erweitert. Bei dieser Art der Modellierung muss ein Ursprung für den Zeitbezug festgelegt werden. Dieser Zeitpunkt wird hier als t_0 bezeichnet und beschreibt den Zeitpunkt der letzten Synchronisation. Die Modellierung der Asynchronität über einen linearen Ansatz führt zu folgender Gleichung:

$$\Delta t(t_i) = \Delta t_{Offset} + \Delta t_{Ratio} \cdot (t_i - t_0) \quad (3.2)$$

mit

- Δt_{Ratio} : Verhältnis der Aufnahmefrequenz zur Frequenz des Referenzsystems []
 t_i : Zeitpunkt i der Bildsequenz [s]
 t_0 : Zeitpunkt der letzten Synchronisation [s]

Weist die Aufnahmefrequenz der Kamera eine Drift auf, wird die Korrekturfunktion zusätzlich um einen Term zweiter Ordnung Δt_{Drift} erweitert. Eine Drift der Aufnahmefrequenz kann beispielsweise durch das Aufheizen des Quarzes in

der Kamera, der die Aufnahmefrequenz steuert, zustande kommen. Eine zeitliche Korrekturfunktion lautet dann wie folgt:

$$\Delta t(t_i) = \Delta t_{Offset} + \Delta t_{Ratio} \cdot (t_i - t_0) + \Delta t_{Drift} \cdot (t_i - t_0)^2 \quad (3.3)$$

mit

Δt_{Drift} : Drift der Aufnahmefrequenz [Hz]

Die beiden Parameter Δt_{Ratio} und Δt_{Drift} können über die folgenden Formeln berechnet werden:

$$\Delta t_{Ratio} = \left(\frac{f}{f_{ref}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

$$\Delta t_{Drift} = f \cdot drift \quad (3.5)$$

mit

f : Aufnahmefrequenz der Kamera [Hz]
 f_{ref} : Frequenz des Referenzsystems [Hz]
 $drift$: Drift der Aufnahmefrequenz der Kamera []

Die Modellierung der Asynchronität ist nicht auf einen Polynomansatz beschränkt, prinzipiell kann ein beliebiger funktionaler Ansatz gewählt werden.

3.2 Integration der Asynchronität in die Bündelausgleichung

Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren erfolgt die räumliche und zeitliche Auswertung der Bildsequenzen simultan. Die Messungen aller Objektpunkte werden in allen Sequenzen und zu allen Zeitpunkten in einer gemeinsamen Ausgleichung analysiert. Die gemeinsame Auswertung aller Messungen hat den Vorteil, dass eventuell auftretende Korrelationen zwischen den Berechnungen der einzelnen Zeitschritte berücksichtigt werden. Dies ist bei einer nach Zeitschritten getrennten Auswertung nicht möglich. Des Weiteren stehen durch die simultane spatio-temporale Transformation zwischen den Sequenzen zusätzliche Informationen zur Verfügung um Mehrdeutigkeiten zu lösen und Fehlzuordnungen aufdecken zu können (siehe Abschnitt 2.2).

3.2.1 Grundprinzip der Auswertung

Zur vereinfachten Darstellung werden für die folgende Beschreibung des Verfahrens die Messungen eines Objektpunkts in zwei Bildsequenzen betrachtet. Analog zur Bündelausgleichung gibt es jedoch bei diesem Verfahren keine Beschränkungen in Bezug auf die Anzahl der Bildsequenzen und die Anzahl der zu analysierenden Objektpunkte.

In Abbildung 3-1 sind Bildausschnitte aus zwei Bildsequenzen dargestellt. Es sind die originären Messwerte eines Punkts, aufgenommen zu den Zeitpunkten $i-1$, i , $i+1$, usw. und die zugehörigen Trajektorien dargestellt. Der linke Teil der Abbildung zeigt den Punkt zu den aufeinander folgenden Zeitpunkten aus der Sequenz, die mit Kamera 1 aufgenommen wurde und der rechte Teil der Abbildung entsprechend die Messwerte aus der Sequenz, die mit Kamera 2 erfasst wurde.

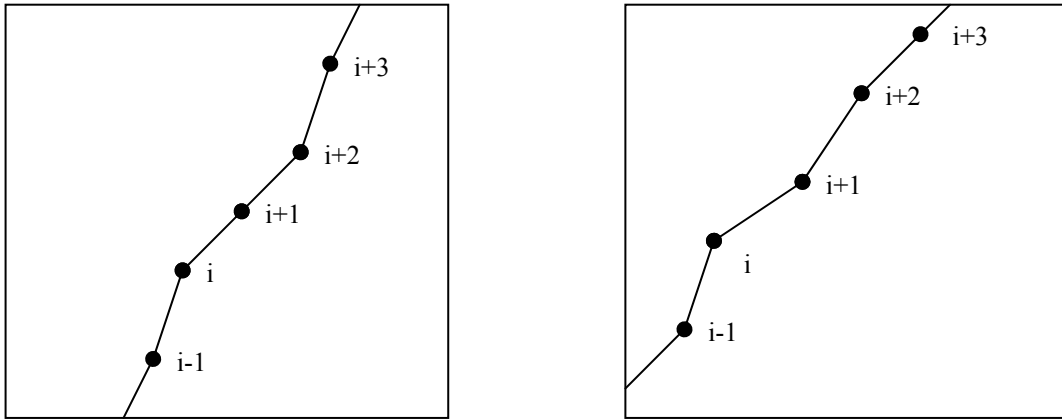


Abbildung 3-1: Bildausschnitte aus zwei Bildsequenzen mit den originären Messwerten eines Punkts aufgenommen zu den Zeitpunkten $i-1$, i , $i+1$, usw. mit den zugehörigen Trajektorien, links: Kamera 1, rechts: Kamera 2

Wurden die Bildsequenzen in Abbildung 3-1 exakt synchron aufgenommen, sind die dargestellten Messungen des Objektpunkts zu den Zeitpunkten $i-1$, i , $i+1$, usw. jeweils homologe Bildpunkte. In der Auswertung können dann aus den Messungen die exakten Objektkoordinaten zu den einzelnen Zeitpunkten ermittelt werden.

Eine Asynchronität zwischen den beiden Sequenzen führt zu einer Verschiebung der jeweiligen Messwerte und somit auch der einer Trajektorie in Relation zur anderen. Im Folgenden wird angenommen, dass die beiden in Abbildung 3-1 dargestellten Messwerte asynchron aufgenommen wurden. Die im linken Teil der Abbildung dargestellten Messwerte aus der Sequenz von Kamera 1 werden in diesem Beispiel als Referenz betrachtet. Die Punkte der im rechten Teil der Abbildung dargestellten Trajektorie der Kamera 2 sind dann entsprechend nicht die homologen Punkte zu den Messwerten aus der Sequenz der Kamera 1. Das korrekte Abbild des jeweiligen Objektpunkts im Bild muss erst entsprechend der vorliegenden Asynchronität durch z.B. eine Interpolation auf der Trajektorie des Objektpunkts zwischen Messwerten von zwei aufeinander folgenden Zeitpunkten bestimmt werden. Da im Vorfeld der Auswertung nicht bekannt ist, ob die Asynchronität größer oder kleiner als Null ist, werden für jeden Schritt der Auswertung Messungen zu drei aufeinander folgenden Zeitpunkten der Sequenz benötigt. Der Interpolationsfaktor, der aus der Asynchronität abgeleitet wird, ist ein Parameter der zeitlichen Korrekturterme, die in das funktionale Modell der Bündelausgleichung integriert werden. Der Interpolationsfaktor bzw. dessen Parameter Δt_{Offset} , Δt_{Ratio} und Δt_{Drift} werden in der Bündelausgleichung als zusätzliche unbekannte Parameter behandelt und mitgeschätzt. Die Modellierung der Asynchronität kann sowohl in Form von Korrekturtermen für die gemessenen Bildkoordinaten, also im Bildraum, als auch in Form von Korrekturtermen für die Objektkoordinaten, also im Objektraum, erfolgen.

Das Ergebnis der Auswertung inklusive der Modellierung der Asynchronität der in Abbildung 3-1 dargestellten asynchronen Messungen ist beispielhaft in Abbildung 3-2 zu sehen.

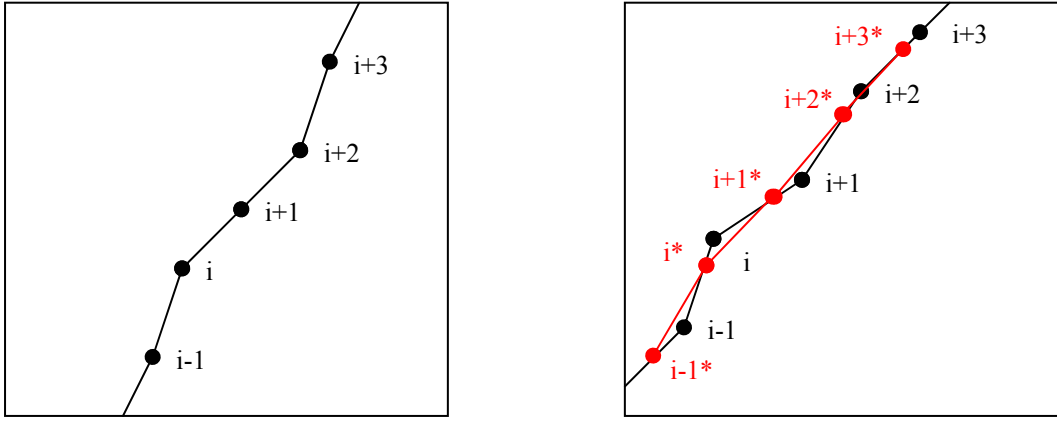


Abbildung 3-2: Bildausschnitte aus zwei Bildsequenzen, links für Kamera 1 mit den originären Messwerten eines Punkts (schwarz) aufgenommen zu den Zeitpunkten $i-1$, i , $i+1$, usw., rechts für Kamera 2 mit den originären Messwerten $i-1$, i , $i+1$, usw. (schwarz) und den korrigierten Messwerten $i-1^*$, i^* , $i+1^*$, usw. (rot) des Punkts

Die schwarzen Punkte im rechten Teil der Abbildung 3-2 sind die Bildmessungen in der mit der zweiten Kamera asynchron aufgenommenen Bildsequenz. Die Bildpunkte $i-1^*$, i^* , $i+1^*$ (rote Punkte in Abbildung 3-2) wurden durch Interpolation zur Eliminierung der Effekte der Asynchronität zwischen den beiden Bildsequenzen, bestimmt. Die Position des Messwerts zum Zeitpunkt i^* auf der Trajektorie wird somit zwischen dem originären Messwert zum Zeitpunkt i und dem originären Messwert zum vorherigen Zeitpunkt $i-1$ interpoliert.

3.2.2 Bestimmung des Interpolationsfaktors aus der Asynchronität

Um die Asynchronität $\Delta t(t_i)$ in das funktionale Modell der Ausgleichung integrieren zu können, muss sie in einen Interpolationsfaktor konvertiert werden, über den dann die Korrekturen an den Messwerten der asynchron aufgenommenen Bildsequenz erfolgen können. Diese Konvertierung besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt wird überprüft, zwischen welchen Messwerten der jeweiligen Trajektorie interpoliert werden muss. Wenn der Betrag der Asynchronität kleiner als der Kehrwert der Aufnahmefrequenz, also der Bildfolgezeit, ist, erfolgt die Interpolation entsprechend des Vorzeichens der Asynchronität zwischen der korrespondierenden Messstelle und der vorherigen oder der folgenden Messstelle. Wenn der Betrag der Asynchronität größer als die Bildfolgezeit ist, wird die Asynchronität zunächst um ein ganzzahliges Vielfaches der Bildfolgezeit reduziert, sodass der Betrag der reduzierten Asynchronität kleiner als die Bildfolgezeit ist (siehe Formel (3.6)).

$$\Delta t_{red}(t_i) = \Delta t(t_i) - n \cdot \frac{1}{f} \quad \text{mit} \quad n = \text{int}[\Delta t(t_i) \cdot f] \quad (3.6)$$

mit

$\Delta t_{red}(t_i)$: reduzierte Asynchronität zum Zeitpunkt t_i der Bildsequenz [s]
 n : Umnummerierungsfaktor aufgrund der Asynchronität

Durch diese Umrechnung muss die Nummerierung der korrespondierenden Punkte um n geändert werden. Somit gehört der Messpunkt i der Referenzbildsequenz zum Messpunkt $i+n$ der zu synchronisierenden Bildsequenz.

In einem zweiten Schritt muss die Asynchronität als zeitlicher Wert für die Integration in das funktionale Modell in einen geometrischen Wert konvertiert werden. Dies erfolgt durch eine Multiplikation der reduzierten Asynchronität $\Delta t_{red}(t_i)$ mit der Aufnahmefrequenz f (siehe Formel (3.7)). Der Interpolationsfaktor der Asynchronität $\Delta_{sync}(t_i)$ bezieht sich dadurch auf den Abstand zwischen zwei zeitlich aufeinander folgenden Messungen eines Objektpunkts.

$$\Delta_{sync}(t_i) = f \cdot \Delta t_{red}(t_i) \quad (3.7)$$

mit

$\Delta_{sync}(t_i)$: Interpolationsfaktor der Asynchronität zum Zeitpunkt t_i der Bildsequenz []

3.2.3 Bildraumbasierter Ansatz

Die Modellierung der Asynchronität im Bildraum erfolgt über die Aufstellung von Korrekturtermen für die gemessenen Bildkoordinaten. Diese Korrekturterme $\Delta x_{sync}(t_i)$ und $\Delta y_{sync}(t_i)$ werden über den Interpolationsfaktor $\Delta_{sync}(t_i)$ und die Bildkoordinatenmessungen eines Punkts in zwei aufeinander folgenden Bildern der Sequenz bestimmt und werden wie folgt aufgestellt:

$$\begin{aligned} \Delta x_{sync}(t_i) &= |\Delta_{sync}(t_i)| \cdot [x(t_{i+sign(\Delta_{sync}(t_i))}) - x(t_i)] \\ \Delta y_{sync}(t_i) &= |\Delta_{sync}(t_i)| \cdot [y(t_{i+sign(\Delta_{sync}(t_i))}) - y(t_i)] \end{aligned} \quad (3.8)$$

mit

$\Delta x_{sync}(t_i), \Delta y_{sync}(t_i)$: Korrekturterme für die Effekte der Asynchronität im Bildraum zum Zeitpunkt t_i der Bildsequenz [mm]

Beim bildraumbasierten Ansatz zur Modellierung der Asynchronität werden die zeitlichen Korrekturterme $\Delta x_{sync}(t_i)$ und $\Delta y_{sync}(t_i)$ in gleicher Weise wie die Korrekturterme zur Modellierung der Verzeichnungsparameter der inneren Orientierung der Kamera $\Delta x_{dist.}$ und $\Delta y_{dist.}$ integriert. Dadurch werden die Kollinearitätsgleichungen wie folgt erweitert:

$$\begin{aligned} x(t_i) &= x_h - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X(t_i) - X_0) + r_{21} \cdot (Y(t_i) - Y_0) + r_{31} \cdot (Z(t_i) - Z_0)}{r_{13} \cdot (X(t_i) - X_0) + r_{23} \cdot (Y(t_i) - Y_0) + r_{33} \cdot (Z(t_i) - Z_0)} + \Delta x_{dist.} + \Delta x_{sync}(t_i) \\ y(t_i) &= y_h - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X(t_i) - X_0) + r_{22} \cdot (Y(t_i) - Y_0) + r_{32} \cdot (Z(t_i) - Z_0)}{r_{13} \cdot (X(t_i) - X_0) + r_{23} \cdot (Y(t_i) - Y_0) + r_{33} \cdot (Z(t_i) - Z_0)} + \Delta y_{dist.} + \Delta y_{sync}(t_i) \end{aligned} \quad (3.9)$$

mit

$x(t_i), y(t_i)$	: Bildkoordinaten des betrachteten Punkts zum Zeitpunkt t_i der Bildsequenz [mm]
c	: Kamerakonstante [mm]
x_h, y_h	: Bildkoordinaten des Bildhauptpunkts [mm]
X_0, Y_0, Z_0	: Objektkoordinaten des Projektionszentrums [mm]
r_{ij}	: Elemente der Rotationsmatrix zwischen dem Objekt- und dem Bildkoordinatensystem
$X(t_i), Y(t_i), Z(t_i)$	: Objektkoordinaten des betrachteten Punkts zum Zeitpunkt t_i der Bildsequenz [mm]
$\Delta x_{dist.}, \Delta y_{dist.}$	: Korrekturterme für die Verzeichnungsparameter der inneren Orientierung [mm]

Eine lineare Interpolation ist im Bildraum nur unter bestimmten Voraussetzungen zulässig. Zunächst muss sich für die Zulässigkeit der linearen Interpolation entlang einer Trajektorie der Objektpunkt zwischen zwei aufeinander folgenden Zeitpunkten mit einer konstanten Geschwindigkeit und Richtung bewegen. Des Weiteren muss, speziell für die lineare Interpolation im Bildraum, die Bewegung parallel zur Bildebene erfolgen. Wird die zweite Annahme erfüllt, ist der Bildmaßstab innerhalb der Trajektorie im Bild konstant und somit wird die Bewegung eines Punkts mit konstanter Geschwindigkeit im Objektraum auch als Trajektorie mit konstanter Geschwindigkeit im Bildraum dargestellt.

Eine Verkipfung der Bildebene zur Bewegungsrichtung führt jedoch zu unterschiedlichen Maßstäben in den verschiedenen Bildbereichen. Dadurch stellt sich eine Objektbewegung mit konstanter Geschwindigkeit in der

Bildebene als eine Bewegung mit variabler Geschwindigkeit dar. Im Extremfall kann bei einer solchen Verkipfung der Bildebene zur Bewegungsrichtung und einer linearen Interpolation im Rahmen der Auswertung ein linearer Parameter der Modellierung der Asynchronität signifikant geschätzt werden, der einzig auf die Verkipfung zurückzuführen ist und keine zeitliche Ursache, wie z.B. eine von der Frequenz des Referenzsystems abweichende Aufnahme Frequenz, hat.

Aus diesem Grund muss für eine exakte Modellierung der Asynchronität im Bildraum statt einer linearen Interpolation eine andere Interpolationsmethode gewählt werden. Eine korrekte Methode zur Interpolation entlang der Trajektorie im Bild ist eine Funktion der Verkipfung der Bildebene zur Bewegungsrichtung. Diese kann im Rahmen der Ausgleichung als Unbekannte mit modelliert und bestimmt werden, jedoch setzt diese Interpolationsmethode voraus, dass die Objektbewegung in einer verkippten Ebene erfolgt und der zu analysierende Objektpunkt sich nur innerhalb dieser Ebene bewegt. Bei einer Bewegung außerhalb der Ebene ist diese Interpolationsmethode wiederum nicht zulässig und führt zu fehlerhaften Ergebnissen. Als Alternative könnte auch die Verkipfung der Bildebene zur Bewegungsrichtung bei jedem Zeitschritt neu modelliert und im Rahmen der Ausgleichung mitgeschätzt werden. Ein allgemeiner Modellierungsansatz besteht in der Berücksichtigung der Asynchronität im Objektraum.

3.2.4 Objektraumbasierter Ansatz

Bei dem Ansatz zur Modellierung der Asynchronität im Objektraum werden statt der Bildkoordinaten die Objektkoordinaten korrigiert. Entsprechend der Asynchronität wird bei diesem objektraumbasierten Ansatz zwischen zwei zeitlich aufeinander folgenden Koordinaten eines Objektpunkts interpoliert. Die Korrekturterme werden zusammen mit dem Interpolationsfaktor und den Objektkoordinaten bestimmt und wie folgt aufgestellt:

$$\begin{aligned}\Delta X_{sync}(t_i) &= |\Delta sync(t_i)| \cdot [X(t_{i+sign(\Delta sync(t_i))}) - X(t_i)] \\ \Delta Y_{sync}(t_i) &= |\Delta sync(t_i)| \cdot [Y(t_{i+sign(\Delta sync(t_i))}) - Y(t_i)] \\ \Delta Z_{sync}(t_i) &= |\Delta sync(t_i)| \cdot [Z(t_{i+sign(\Delta sync(t_i))}) - Z(t_i)]\end{aligned}\quad (3.10)$$

mit

$\Delta X_{sync}(t_i), \Delta Y_{sync}(t_i), \Delta Z_{sync}(t_i)$: Korrekturterme für die Effekte der Asynchronität im Objektraum zum Zeitpunkt t_i [mm]

Die Korrekturterme $\Delta X_{sync}(t_i)$, $\Delta Y_{sync}(t_i)$ und $\Delta Z_{sync}(t_i)$ der zeitlichen Modellierung der Asynchronität im Objektraum werden wie folgt in die Kollinearitätsgleichungen integriert:

$$\begin{aligned}x(t_i) &= x_h - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X(t_i) + \Delta X_{sync}(t_i) - X_0) + r_{21} \cdot (Y(t_i) + \Delta Y_{sync}(t_i) - Y_0) + r_{31} \cdot (Z(t_i) + \Delta Z_{sync}(t_i) - Z_0)}{r_{13} \cdot (X(t_i) + \Delta X_{sync}(t_i) - X_0) + r_{23} \cdot (Y(t_i) + \Delta Y_{sync}(t_i) - Y_0) + r_{33} \cdot (Z(t_i) + \Delta Z_{sync}(t_i) - Z_0)} + \Delta x_{dist.} \\ y(t_i) &= y_h - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X(t_i) + \Delta X_{sync}(t_i) - X_0) + r_{22} \cdot (Y(t_i) + \Delta Y_{sync}(t_i) - Y_0) + r_{32} \cdot (Z(t_i) + \Delta Z_{sync}(t_i) - Z_0)}{r_{13} \cdot (X(t_i) + \Delta X_{sync}(t_i) - X_0) + r_{23} \cdot (Y(t_i) + \Delta Y_{sync}(t_i) - Y_0) + r_{33} \cdot (Z(t_i) + \Delta Z_{sync}(t_i) - Z_0)} + \Delta y_{dist.}\end{aligned}\quad (3.11)$$

Eine lineare Interpolation im Objektraum ist, im Gegensatz zur Modellierung im Bildraum, allgemein gültig. Allerdings gelten auch hier Annahmen für die Interpolation entlang einer Trajektorie im Bildraum, wie die Einhaltung einer konstanten Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung des Objekts zwischen zwei zeitlich aufeinander folgenden Messungen eines Objektpunkts relativ zur Kamera. Die Bewegungsrichtung des Objektpunkts kann jedoch im Bezug zur Bildebene beliebig sein.

Da die Interpolation im Objektraum allgemeingültig ist, ist diese der Modellierung im Bildraum vorzuziehen und wird im Folgenden verwendet.

3.2.5 Ausgleichungsmodell

Die in diesem Kapitel beschriebene Erweiterung der Bündelausgleichung zur Berücksichtigung der Asynchronität beruht auf dem allgemeinen Prinzip der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen, bei dem die Beobachtungen L eine Funktion der Unbekannten X sind.

$$L = \varphi(X) \quad (3.12)$$

Da bei dem beschriebenen Verfahren zur Berücksichtigung der Asynchronität alle Bilder der Sequenzen simultan ausgewertet werden, sind die Unbekannten X die Parameter der inneren und äußeren Orientierungen der jeweiligen Kameras und die Objektkoordinaten zu allen Zeitpunkten der Sequenz. Des Weiteren werden die Parameter der Modellierung der Asynchronität Δt_{Offset} , Δt_{Ratio} und Δt_{Drift} ebenfalls als Unbekannte behandelt, die im Rahmen der Bündelausgleichung bestimmt werden. Die Beobachtungen L sind die Bildkoordinatenmessungen der Objektpunkte in allen Einzelbildern der Sequenzen, die über automatische Erkennungsalgorithmen bestimmt werden. Die Beobachtungen werden gleichgewichtet in das stochastische Modell der Ausgleichung eingeführt, sodass die Gewichtsmatrix P zur Einheitsmatrix E wird.

Der weitere Ablauf der Auswertung erfolgt nach dem bekannten Schema einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen durch die Linearisierung des erweiterten funktionalen Modells (siehe Formel (3.11)) nach den Unbekannten durch eine Taylor-Reihenentwicklung, die nach dem linearen Glied abgebrochen wird, der Aufstellung und Inversion der Normalgleichungsmatrix N und der anschließenden Parameterschätzung.

3.3 Diskussion zur Anwendbarkeit des Ansatzes

Das beschriebene Verfahren stellt eine Erweiterung der Bündelausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen dar und weist somit die gleichen Vorteile auf, wie z.B. die simultane Auswertung einer beliebigen Anzahl von Bildsequenzen und das hohe Genauigkeitspotential. Des Weiteren kann das Verfahren durch die Integration von zusätzlichen Informationen, wie z.B. von der Integration von Bewegungsmodellen in das funktionale Modell erweitert werden. Auch lassen sich detaillierte Aussagen über die geometrische Stabilität und Zuverlässigkeit des funktionalen Modells durch Untersuchungen der Kofaktormatrix der Verbesserungen Q_{vv} ableiten.

Wie bei einer Bündelausgleichung ohne Berücksichtigung der Asynchronität werden für alle Unbekannten möglichst exakte Näherungswerte benötigt. Die Beschaffung von Näherungswerten für die Orientierungsparameter und die Objektkoordinaten erfolgt analog zu einer Bündelausgleichung ohne Berücksichtigung der Asynchronität. Die Näherungswerte für die unbekannten Parameter zur Modellierung der Asynchronität werden, wenn kein Vorwissen vorliegt, im einfachsten Fall als Null angenommen. Alternativ dazu kann auch ein vorher definierter Bereich einer möglichen Asynchronität systematisch analysiert und die beste Lösung als Näherungswert für die anschließende Bündelausgleichung genutzt werden.

Aufgrund der Tatsache, dass keine Annahmen über die Richtung und Geschwindigkeit der Objektbewegung sowie die Orientierung der Kameras in Bezug zur Bewegungsrichtung getroffen werden, erfolgt die Modellierung der Asynchronität im Objektraum durch eine lineare Interpolation. Dadurch wird implizit angenommen, dass die Objektgeschwindigkeit und Bewegungsrichtung zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern einer Sequenz konstant sind.

Da im Vorfeld der Auswertung meist nicht bekannt ist, ob die Asynchronität einer Bildsequenz im Bezug zur Referenzsequenz größer oder kleiner als Null ist, werden mindestens drei zeitlich aufeinander folgende Messungen eines Objektpunkts im Bild benötigt um Betrag und Vorzeichen der Asynchronität exakt bestimmen zu können.

Besteht der Aufnahmeverband aus nur zwei Kameras und findet die Objektbewegung ausschließlich innerhalb der Epipolarebene statt, liefert das beschriebene Verfahren keine korrekten Ergebnisse. In diesem Fall wirkt sich die Asynchronität ausschließlich als systematische Punktverschiebung innerhalb der Epipolarebene aus, da sich die beiden

Abbildungsstrahlen stets in dieser Ebene schneiden (siehe Abschnitt 2.1). Eine korrekte Bestimmung der Asynchronität und somit eine exakte Ermittlung der Objektkoordinaten ist bei dieser Konstellation nicht möglich.

Werden die Kamerapositionen nicht mit Hilfe von Passpunkten bestimmt, dürfen sich nicht alle Objektpunkte mit einer konstanten Geschwindigkeit in die gleiche Richtung bewegen. Lassen sich die Bewegungen aller Objektpunkte innerhalb der Bildsequenz jeweils von einem Zeitschritt zum nächsten Zeitschritt durch die gleiche dreidimensionale Helmert-Transformation ineinander überführen, können die Kamerapositionen und die Einflüsse der Asynchronität nicht voneinander getrennt werden. Die jeweilige Kameraposition wird entsprechend der Asynchronität und der Bewegungsrichtung der Objektpunkte verschoben und die berechnete Asynchronität ergibt sich zu Null. Eine solche Konstellation ist schematisch in Abbildung 3-3 dargestellt.

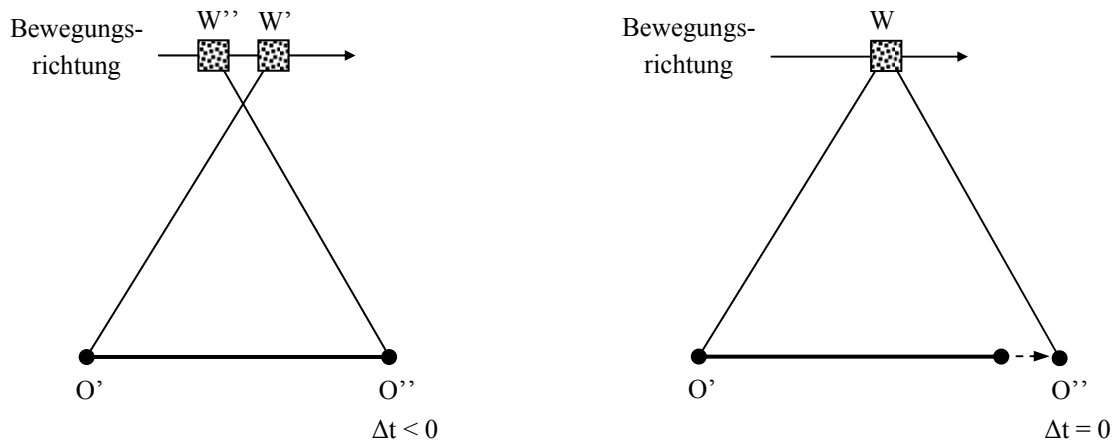


Abbildung 3-3: Auswirkungen der Ermittlung der äußeren Orientierung der Kameras über Verknüpfungspunkte bei konstanter Bewegung der Objektpunktwolke, links: Konstellation bei der Aufnahme, rechts: berechnete Konstellation

Die in Abbildung 3-3 gezeigte Konstellation besteht aus zwei Kameras O' und O'' , die die Bewegung einer Objektpunktwolke W aufnehmen. Die Bewegung der Punkt wolke W verläuft beliebig im Raum, jedoch gleichförmig, d.h. dass sich die Punkt wolke jeweils von einem Zeitschritt zum nächsten über die gleiche Helmert-Transformation ineinander transformieren lässt. Die äußere Orientierung der linken Kamera O' wird bei dieser Konstellation über Passpunkte und die der rechten Kamera O'' über die Objektpunkt wolke W bestimmt. Die beiden Kameras erfassen die Bewegung der Punkt wolke jedoch asynchron. Die Kamera O' nimmt die Punkt wolke an der Position W' und die Kamera O'' bereits zeitlich früher an der Position W'' auf (siehe linker Teil von Abbildung 3-3). Die Asynchronität Δt ist somit kleiner als Null. Das Ergebnis der Bildsequenzauswertung ist im rechten Teil von Abbildung 3-3 dargestellt. Bei Verwendung des neuen Verfahrens wird nicht die korrekte Asynchronität bestimmt, sondern stattdessen die äußere Orientierung der zweiten Kamera O'' entsprechend der Auswirkung der Asynchronität verschoben. Die Verschiebung der Kameraposition entspricht exakt der Bewegung, die die Punkt wolke W zwischen den asynchronen Aufnahmen der beiden Kameras zurückgelegt hat. Eine korrekte Bestimmung der Asynchronität sowie der Objektkoordinaten ist bei einer solchen Konstellation somit nicht möglich und es kann auch dazu kommen, dass das Ausgleichungssystem divergiert.

Eine Abweichung eines einzelnen Punkts in seiner Bewegung oder Geschwindigkeit zu den anderen Punkten der Punkt wolke ermöglicht die exakte Bestimmung der Kameraposition und der Asynchronität, da die Punkt wolken zu den jeweiligen Zeitschritten dann nicht mehr über die gleiche Helmert-Transformation ineinander umgerechnet werden können.

4 Experimentelle Untersuchungen

Das entwickelte Verfahren wird zur Verifizierung bei der Auswertung von zwei experimentellen Untersuchungen angewendet. Beim ersten der beiden Versuche wird eine sich drehende dreidimensionale Testtafel mit zwei digitalen Highspeed-Kameras unter Laborbedingungen aufgenommen. Als zweiter Versuch wird ein regulär durchgeführter Fahrzeugsicherheitsversuch verwendet, der mit einem Verbund von sechs digitalen Highspeed-Kameras erfasst wird. In diesem Kapitel werden die eingesetzte Versuchsausrüstung, die Aufnahmekonstellation und weitere Versuchsbedingungen der durchgeführten praktischen Versuche detailliert beschrieben.

4.1 Allgemeine Versuchsausrüstung

Die aufgeführte Versuchsausrüstung ist speziell auf die Anwendung bei Sicherheitsversuchen in der Automobilindustrie ausgelegt. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten wie die eingesetzten Highspeed-Kameras, die Zielmarkentypen und die Beleuchtungseinrichtung näher erläutert.

4.1.1 Highspeed-Kameras

Die im Rahmen der Versuche eingesetzten Kameras sind digitale Highspeed-Kameras. Durch ihre Konstruktion können sie auch während eines Versuchs im Fahrzeug eingesetzt werden und halten den Beschleunigungen beim Aufprall des Fahrzeugs auf die Barriere stand. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Kameras jedoch nur stationär, d.h. außerhalb des Fahrzeugs, eingesetzt.

Konkret wurden die digitalen Highspeed-Kameras NAC Hi-Dcam II und die Redlake HG Imager 2000 verwendet (siehe Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Eingesetzte Highspeed-Kameras, links: NAC Hi-Dcam II (NAC 2004), rechts: Redlake HG Imager 2000 (REDLAKE 2004)

Die versuchsrelevanten Eigenschaften der beiden Kameras sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Die Angaben für Auflösung und Aufnahmefrequenz stellen nicht die maximalen Werte dar, sondern geben die Kameraeinstellungen während der Versuchsdurchführungen wieder. So liefert z.B. die NAC Hi-Dcam II eine maximale Auflösung von 1280 Pixel x 1024 Pixel, allerdings nur bei einer Aufnahmefrequenz von 500 Hz. Die maximale Aufnahmefrequenz dieser Kamera liegt bei 8 000 Hz, jedoch beträgt die Auflösung dann nur 1280 Pixel x 65 Pixel.

Kameraeigenschaften	Hi-Dcam II	HG Imager 2000
Firma	NAC Image Technology	Redlake Inc.
Sensortyp	CMOS	CCD
Auflösung	1280 Pixel x 512 Pixel	512 Pixel x 384 Pixel
Farbtiefe	24 bit	24 bit
Pixelgröße	12 μm	16 μm
Aufnahmefrequenz	1 000 Hz	1 000 Hz

Tabelle 4-1: Eigenschaften der eingesetzten Highspeed-Kameras

Eine weitere Besonderheit der beiden Kameras ist, dass sie einen Ringspeicher für die Zwischenspeicherung einer Sequenz von ca. 1 000 Bildern besitzen. Bei einem Ringspeicher werden die Bilder der Reihe nach gespeichert bis alle Speicherplätze belegt sind. Wird bei komplett belegtem Ringspeicher ein weiteres Bild aufgenommen, so wird das zuerst aufgenommene Bild überschrieben. Durch den Ringspeicher ist es möglich, die Kameras synchron zu starten und dann kontinuierlich Bilder aufzunehmen. Mit Hilfe eines Triggersignals wird das erste Bild der gewünschten Sequenz markiert. Dies kann das Bild sein, welches zum Zeitpunkt der Übertragung des Triggersignals gerade aufgenommen wird oder bereits aufgenommen wurde. Die Markierung verhindert das Überschreiben des Bilds im Ringspeicher, die Kamera nimmt nur noch solange Bilder auf, bis der Ringspeicher einmal komplett überschrieben wurde. Durch die Verwendung eines Ringspeichers können bestimmte Synchronisationsverfahren genutzt werden, die am Ende dieses Kapitels detailliert beschrieben werden.

Bei Fahrzeugsicherheitsversuchen wird zum Crashbeginn, also zu dem Zeitpunkt, bei dem das Fahrzeug zum ersten Mal das Hindernis berührt, das Triggersignal an die Kameras übertragen. Dieser Zeitpunkt wird als T_0 bezeichnet. Für die Analyse der Sicherheitsversuche ist es wichtig, dass auch Aufnahmen vor dem Crashbeginn zur Verfügung stehen. Mit Hilfe dieser Aufnahmen wird analysiert, unter welchen Winkel und mit welcher Geschwindigkeit das Fahrzeug gegen das Hindernis gefahren ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Zeitbereich von 50 ms vor T_0 bis ca. 150 ms nach T_0 erfasst und analysiert. Vor dem Versuch werden die Kameras so eingestellt, dass das 50 ms vor dem T_0 -Signal aufgenommene Bild die Markierung erhält, die das Überschreiben im Ringspeicher verhindert.

4.1.2 Zielmarkentypen und Bildkoordinatenmessung

Bei Sicherheitsversuchen werden für die photogrammetrische Auswertung Zielmarken zur Signalisierung der Versuchsobjekte eingesetzt. Bei den Versuchen wurden drei unterschiedliche Zielmarkentypen verwendet: die DOT-Marke, die MXT-5-Marke mit fünf Punkten und eine codierte DOT-Marke, die so genannte CODE-Marke (siehe Abbildung 4-2). Für eine korrekte und automatische Bestimmung des Markenmittelpunkts mit Bildverarbeitungsalgorithmen muss die Zielmarke bestimmte Anforderungen erfüllen. Sie muss sich durch einen starken Kontrast deutlich vom Hintergrund abgrenzen und im Bild einen bestimmten vom Markentyp abhängigen Minstdurchmesser aufweisen (siehe Abbildung 4-2). Die benötigten Minstdurchmesser wurden von den Entwicklern der Erkennungsalgorithmen festgelegt und haben sich in der Praxis auch bestätigt. Der Minstdurchmesser für die DOT-Marke beträgt 5 Pixel im Bild, der für die MXT-5-Marke 9 Pixel und der für die CODE-Marke 15 Pixel.

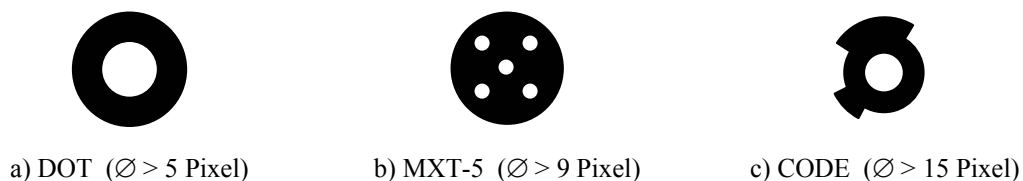


Abbildung 4-2: Eingesetzte Zielmarkentypen mit der Mindestanforderung an den Markendurchmesser im Bild

Neben diesen zweidimensionalen Zielmarkentypen werden auch dreidimensionale Zielmarken eingesetzt. Diese werden für Aufnahmekonstellationen genutzt, bei denen die Kameras das Messvolumen bzw. die Zielmarken aus unterschiedlichen Richtungen aufnehmen. Bei Sicherheitsversuchen haben sich Golfbälle als dreidimensionale Zielmarken in der Praxis bewährt. Sie haben den Vorteil, dass sie das Licht durch ihre regelmäßige Oberflächenstruktur diffus reflektieren und dadurch keine Glanzpunkte auf der Oberfläche entstehen lassen, die zu Mittelpunktverschiebungen bei der automatischen Markenmessung führen können. Eine weitere vorteilhafte Eigenschaft der Golfbälle ist, dass sie von jedem Aufnahmestandpunkt aus als weiße Kreise im Bild abgebildet werden, wodurch sie mit den Bildverarbeitungsalgorithmen für DOT-Marken detektiert werden können.

In Untersuchungen mit unterschiedlichen Versuchsbedingungen wurde die Bildkoordinatenmessgenauigkeit der Bildverarbeitungsalgorithmen zur Erkennung der Zielmarkentypen analysiert. Dabei wurde für die drei Markentypen DOT, MXT-5 und CODE eine Genauigkeit im Bereich von 0.1 bis 0.2 Pixel unter Versuchsbedingungen ermittelt.

Unter Laborbedingungen wurden deutlich bessere Genauigkeiten, die im Bereich von 0.05 Pixel liegen, erzielt. Da für die Erkennung des Golfballs im Bild die gleichen Bildverarbeitungsalgorithmen genutzt werden, lässt sich die Genauigkeit für die Bestimmung der DOT-Marke auch auf den Golfball als dreidimensionale Zielmarke übertragen.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wird die Bildkoordinatenmessung mit den automatischen Erkennungsalgorithmen durchgeführt. Daher wird von einer Bildkoordinatenmessgenauigkeit von 0.05 Pixel für Laborversuche (Versuch 1) und von 0.2 Pixel für reale Sicherheitsversuche (Versuch 2) ausgegangen.

4.1.3 Beleuchtungseinrichtung

Eine leistungsfähige Beleuchtung ist eine Voraussetzung für Aufnahmen mit Highspeed-Kameras, da aufgrund der hohen Aufnahmefrequenz von 1 000 Hz nur sehr kurze Belichtungszeiten genutzt werden können.

Für den ersten Versuch, der unter Laborbedingungen durchgeführt wurde, standen insgesamt vier Scheinwerfer zur Verfügung, die für eine flächenhafte und ausreichende Ausleuchtung der SAE-Testtafel sorgten.

Bei dem zweiten Versuch mussten ein Messvolumen von etwa 3 m x 5 m x 3 m sowie die Zielmarken an den Hallenwänden ausgeleuchtet werden. Dafür standen etwa 50 räumlich verteilte Scheinwerfer zur Verfügung. Durch das Zusammenwirken der Scheinwerfer wurde im Messvolumen eine Lichtleistung von ca. 160 000 Lux erreicht, wodurch optisch qualitativ gute Aufnahmen bei einer Aufnahmefrequenz von 1 000 Hz und einer Belichtungszeit der Kameras von ca. 250 µs realisiert werden konnten. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Messmarken hell genug ausgeleuchtet wurden, um in den Bildsequenzen automatisch und zuverlässig detektiert werden zu können.

4.2 Versuch 1 – Rotation einer SAE-Testtafel

Das Ziel des ersten Versuchs ist die Überprüfung der Anwendbarkeit des neuen Verfahrens zur photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen. Dabei wird unter Laborbedingungen die erreichbare theoretische und empirische Genauigkeit des Verfahrens ermittelt. Zur Verifizierung des Verfahrens wurde bei diesem Versuch eine Sequenz einer kompletten Drehung einer dreidimensionalen SAE-Testtafel (SAE - Society of Automotive Engineers) um ihren Mittelpunkt aufgenommen. Zusätzlich stehen zur Verifizierung der ermittelten Asynchronität die Messwerte eines Synchronometers (siehe Abschnitt 2.3.3.3) zur Verfügung. Für die weitere Beurteilung der ermittelten Ergebnisse werden aus den berechneten Koordinaten der Objektpunkte der Testtafel Streckenlängen abgeleitet und diese den bekannten Längen der Strecken zwischen den Objektpunkten gegenübergestellt.

4.2.1 Räumliches Bezugssystem

Bei diesem Versuch wird die dreidimensionale SAE-Testtafel (siehe Abbildung 4-3) als Koordinatenbezugssystem und als Versuchsobjekt eingesetzt. Der Aufbau und die Verteilung der Zielmarken der Testtafel entspricht der SAE-Norm J211/2 (SAE 1995).

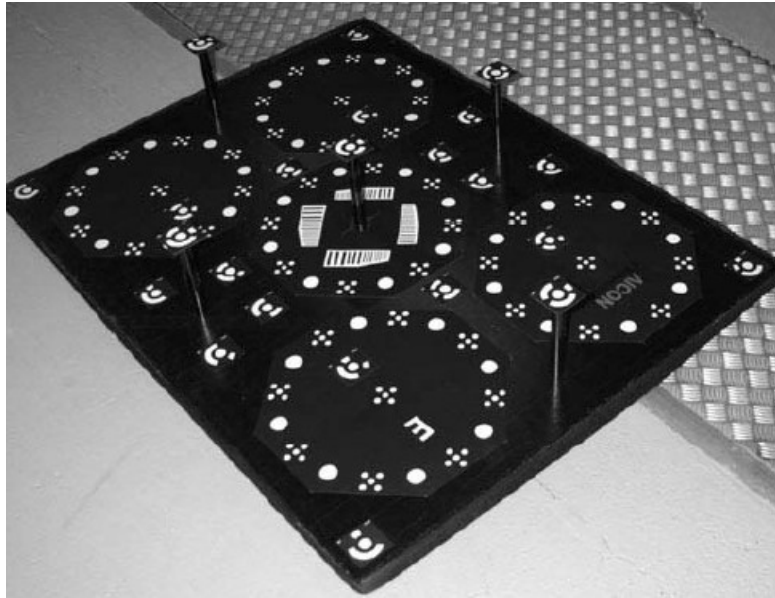


Abbildung 4-3: SAE-Testtafel

Auf der dreidimensionalen Testtafel sind insgesamt 107 Punkte mit Hilfe der verschiedenen Markentypen DOT, MXT-5 und CODE aufgebracht. In der Tafelebene sind die Punkte in fünf symmetrischen Kreisen angeordnet. Des Weiteren gibt es fünf räumlich auf der Tafel verteilte Hochpunkte in einem Abstand von jeweils ca. 20 cm zur Tafelebene, sodass das Passpunktfeld eine gewisse Tiefeninformation aufweist. Die Koordinaten der Marken auf der Tafel wurden in einer Vorabkalibrierung im Labor mit einer Standardabweichung von 0.01 mm bestimmt und dienen in allen weiteren Analysen als Referenz.

4.2.2 Versuchskonstellation

In diesem Versuch wird die SAE-Testtafel so auf ein Drehgestell montiert, dass die Drehung der Tafel annähernd in einer Ebene erfolgt und das Zentrum der Tafel dabei gleichzeitig das Drehzentrum darstellt. Die sich drehende SAE-Testtafel wird von zwei digitalen Highspeed-Kameras vom Typ NAC Hi-Dcam II (siehe Tabelle 4-1) mit einer Brennweite von jeweils 16 mm und einer Frequenz von 1 000 Hz aufgenommen. Je nach Entfernung zum Drehzentrum haben die Objektpunkte auf der SAE-Testtafel eine unterschiedliche Geschwindigkeit. Die maximale Geschwindigkeit der Objektpunkte in den Ecken der Testtafel beträgt ca. 7 m/s. Das Koordinatensystem ist wie folgt ausgerichtet: Die Z-Achse des Systems ist parallel zur Rotationsachse der SAE-Testtafel und die X-Achse ist in etwa parallel zur Ausrichtung der Kamerabasis.

Die Aufnahmekonstellation dieses Versuchs ist schematisch in Abbildung 4-4 dargestellt. Die beiden Kameras sind in einer Entfernung von ungefähr 1.9 m zur Tafel mit einem Abstand zueinander von ca. 28 cm aufgestellt. Daraus ergibt sich ein Basis-Abstand-Verhältnis von 1:7. Der Strahlenschnittwinkel an der SAE-Testtafel beträgt ca. 20°. Die optischen Achsen der Kameras sind um etwa 30° zur Z-Achse des Koordinatensystems geneigt.

4.3 Versuch 2 - Sicherheitsversuch

Im zweiten Versuch werden die Bildsequenzen eines Fahrzeugsicherheitsversuchs analysiert. Bei diesem Frontalcrashversuch wird das Fahrzeug auf eine Geschwindigkeit von 15.6 m/s (ca. 56 km/h) beschleunigt und prallt gegen eine deformierbare Barriere (Defo-Barriere).

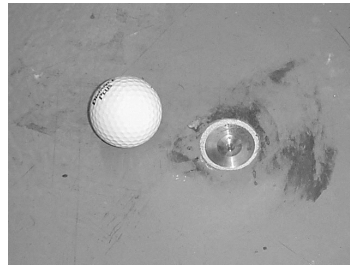
Im Rahmen dieser Arbeit ist das Ziel dieser Versuchsauswertung die Überprüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität bei der Analyse von Sicherheitsversuchen. Zusätzlich wird eine Möglichkeit zur Genauigkeitssteigerung der Versuchsauswertung durch die Berücksichtigung der Asynchronität aufgezeigt.

4.3.1 Räumliches Bezugssystem

Als räumliches Bezugssystem dient bei diesem Versuch das Koordinatensystem der Versuchshalle, dass durch verschiedene räumlich verteilte Zielmarken realisiert ist. Dies sind zum einen zweidimensionale Zielmarken, die an die Wände der Halle geklebt wurden (siehe Abbildung 4-5a), und zum anderen dreidimensionale Zielmarken, die direkt im Messvolumen auf dem Hallenboden positioniert sind. Eine Besonderheit der hier eingesetzten dreidimensionalen Zielmarken ist, dass die Golfbälle nicht fest mit dem Hallenboden verbunden sind, sondern in präzise gefertigten Vertiefungen von in den Boden eingelassenen Metallzylindern positioniert werden (siehe Abbildung 4-5b und c).



a) Wandmarken



b) Golfball neben Zylinder



c) Positionierter Golfball

Abbildung 4-5: Passpunkte des Hallenkoordinatensystems bei Sicherheitsversuchen der Volkswagen AG

Eine starre Befestigung der Golfbälle im Hallenboden ist nicht zulässig, denn das Fahrzeug könnte während des Versuchs in seiner Bewegung behindert werden. Durch die Positionierung in den Vertiefungen der Metallzylinder ist die exakte Position der Golfbälle zum einen reproduzierbar und zum anderen wird das Fahrzeug bei Kontakt mit den Golfbällen nicht in seiner Bewegung behindert, weil sich der Golfball durch den Kontakt z.B. mit dem Reifen des Fahrzeugs aus seiner Position bewegt.

4.3.2 Versuchskonstellation

Für die photogrammetrische Auswertung des Frontalcrashversuchs werden die Bildsequenzen von räumlich um das Messvolumen verteilten digitalen Highspeed-Kameras genutzt. Die Aufnahmekonstellation ist schematisch als Aufsicht in Abbildung 4-6 dargestellt. Alle eingesetzten Kameras sind vom Typ Redlake HG Imager 2000 (siehe Tabelle 4-1).

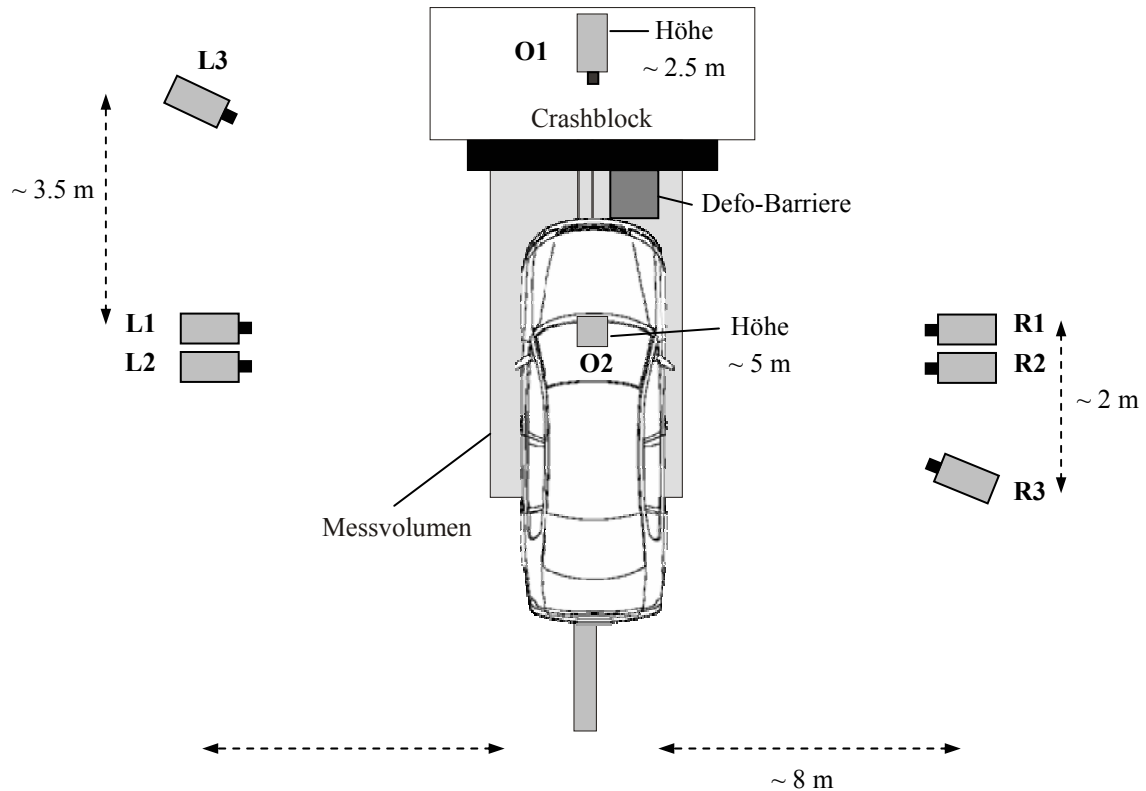


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung der Aufnahmekonstellation bei einem Frontalcrashversuch (Aufsicht, nicht maßstäblich)

Die Aufnahmekonfiguration, d.h. die Positionierung der Kameras ist zum Teil vom Gesetzgeber und zum Teil durch den Versuchsingenieur vorgeschrieben. So sind die Positionen für die Ansichten von links (L1 und L2), von rechts (R1 und R2), von oben (O2) und vom Crashblock (O1) vordefiniert. Ebenso sind die Sichtbereiche der Kameras, d.h. die Brennweiten festgelegt: L1 und R1 = 17 mm, L2 und R2 = 35 mm, O1 = 10 mm, O2 = 8 mm. Die Positionen der beiden Kameras L2 und R2 entsprechen annähernd den Positionen der Kameras L1 und R1, haben allerdings deutlich längere Brennweiten, sodass sie nur bestimmte Bereiche, wie die Bewegung des Dummykopfs, und nicht die Bewegung des gesamten Fahrzeugs erfassen. Somit können die beiden Kameras L2 und R2 nicht für die Bestimmung der Fahrzeugkinematik genutzt werden. Für die photogrammetrische Auswertung stehen für diesen Versuch zwei weitere Kameras (L3 und R3) mit einer Brennweite von jeweils 16 mm zur Verfügung, die je nach Versuchsart unterschiedlich positioniert werden können. Da das Fahrzeug bei diesem Versuch mit dem rechten Teil der Front auf die Defo-Barriere trifft, dreht sich das Heck des Fahrzeugs nach dem Auftreffen nach links. Um für diese Drehung optimale Messwerte der Fahrzeugkinematik zu erhalten, wurden die beiden Kameras vorne links (L3) und hinten rechts (R3) positioniert. Diese Kamerakonstellation, die zur photogrammetrischen Bildsequenzauswertung genutzt wird, besteht somit aus sechs Kameras und lässt sich in drei Kamerapaare aufteilen. Die beiden Kameras auf den Positionen L1 und L3 erfassen die linke Seite des Fahrzeugs, die Kameras auf den Positionen R1 und R3 entsprechend die rechte Seite und die Kameras auf den Positionen O1 und O2 nehmen das Fahrzeug von oben auf. Die Überlappungsbereiche zwischen den Sichtfeldern der drei Kamerapaare beschränken sich jeweils auf die Bereiche im vorderen Teil des Fahrzeugs.

4.3.3 Versuchsvorbereitung und -durchführung

Die photogrammetrische Auswertung dieser Versuchart wird zur Bestimmung der Fahrzeug- und Dummykinematik während des Versuchs durchgeführt. Bei dem verwendeten Versuch wird das Fahrzeug auf eine Geschwindigkeit von 15.6 m/s beschleunigt und trifft dann auf die Defo-Barriere. Dieser Vorgang wird von den sechs Kameras mit einer Frequenz von 1 000 Hz aufgenommen.

Im Vorfeld des Versuchs wurde die Kalibrierung der sechs digitalen Highspeed-Kameras durchgeführt. Dies geschah über eine Testfeldkalibrierung mit der SAE-Testtafel. Die Bestimmung der äußeren Orientierungen der Kameras erfolgt während des Versuchs über das in der Versuchshalle installierte Passpunktfeld, bestehend aus Zielmarken an den Hallenwänden und Golfbällen auf dem Boden. Die Einmessung der Passpunktkoordinaten erfolgte vorab mit einer Standardabweichung von 0.1 mm.

Die Bestimmung der Dummy- und Fahrzeugkinematik erfolgt über die Signalisierung von bestimmten Teilen der Versuchsobjekte mit zweidimensionalen Zielmarken. Diese werden räumlich verteilt auf das Fahrzeug und die Köpfe der beiden Dummies aufgebracht. Für die Signalisierung am Fahrzeug werden DOT-Marken und für die Signalisierung auf den Dummyköpfen MXT-5-Marken verwendet. Im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung des Versuchs werden die Bewegungen der einzelnen Zielmarken während des analysierten Zeitbereichs ermittelt. Die ermittelten dreidimensionalen Trajektorien liegen zunächst im Hallenkoordinatensystem vor. Um die Bewegungen der einzelnen Zielmarken auf das Fahrzeug und die Dummies zu übertragen und somit die Bewegungen bewerten zu können, müssen die exakten Positionen der Marken auf dem Fahrzeug und den Dummyköpfen in ihren jeweiligen Koordinatensystemen bekannt sein.

Die Koordinaten der Zielmarken am Fahrzeug werden in einer photogrammetrischen Fahrzeugvorvermessung hochgenau im Fahrzeugkoordinatensystem bestimmt. Das Fahrzeugkoordinatensystem sowie die Verteilung der Zielmarken auf der linken Fahrzeugseite und auf der Fahrzeugoberseite sind schematisch in Abbildung 4-7 dargestellt. Die Signalisierung der rechten Fahrzeugseite erfolgt analog zur linken Seite. Der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems befindet sich in der Mitte der Vorderachse des Fahrzeugs. Die X -Achse zeigt vom Ursprung aus zum Heck des Fahrzeugs, die Y -Achse verläuft entlang der Vorderachse zum rechten Rad und die Z -Achse ergänzt das rechtshändige System. Die Standardabweichungen der in der Fahrzeugvorvermessung ermittelten Objektpunktkoordinaten liegen bei ca. 0.2 mm.

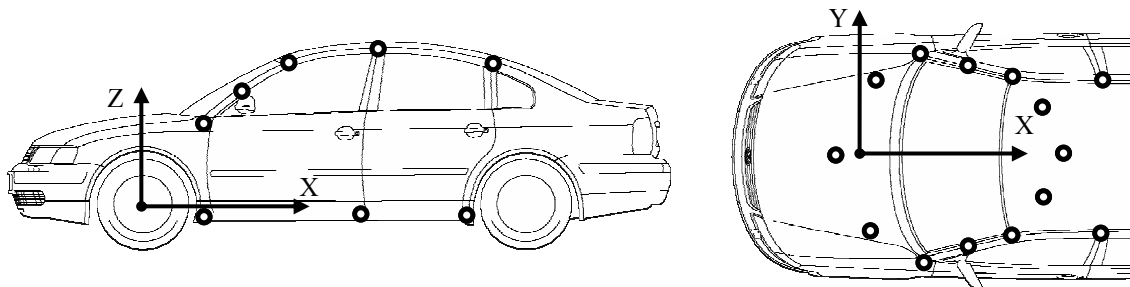


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung des Fahrzeugkoordinatensystems und der Verteilung der Zielmarken auf dem Fahrzeug, links: linke Fahrzeugseite, rechts: Fahrzeugoberseite

Die Zielmarken auf den Dummyköpfen werden ebenfalls vor dem Versuch in einem eigenen Koordinatensystem eingemessen. In der Regel werden auf jeder Seite des Dummykopfs drei Zielmarken vom Typ MXT-5 geklebt (siehe Abbildung 4-8). Die Position der mittleren Marken auf den beiden Kopfseiten ist exakt vorgegeben, da sie auf der Y -Achse des Kopfskoordinatensystems liegen sollen. Der Ursprung des Dummykopfskoordinatensystems liegt im Zentrum des Dummykopfs, also exakt zwischen den beiden mittleren Marken auf den Kopfseiten. Die X -Achse zeigt zur Rückseite des Dummykopfs, die Y -Achse verläuft vom Ursprung aus zur rechten Hälfte des Dummykopfs und die Z -Achse ergänzt wiederum das rechtshändige Koordinatensystem. Die Standardabweichungen der ermittelten Koordinaten der Zielmarken auf dem Dummykopf liegen bei ca. 0.1 mm.

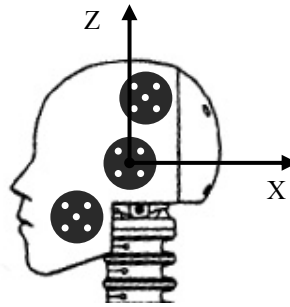


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung des Dummykopfkoordinatensystems und der Verteilung der Zielmarken auf dem Dummykopf, linke Kopfseite

Zur Steuerung der Synchronisation und der Bildaufnahme waren alle Kameras mit einer zentralen Steuereinheit verbunden. Da bei Sicherheitsversuchen auch Bilder vor dem Crashbeginn bzw. vor T_0 benötigt werden, wurden die Kameras eine gewisse Zeit vor dem Crash mit der Defo-Barriere synchron gestartet und nahmen dann fortlaufend Bilder auf. Bei diesem Versuch wurde zur Synchronisation der Kameras das Frame-Sync Verfahren genutzt, bei dem ein freies Triggersignal zur Synchronisation verwendet wird (siehe Abbildung 2-3b). Die Funktionsweise dieses Verfahrens zur Synchronisation mehrerer Kamera ist schematisch in Abbildung 4-9 dargestellt.

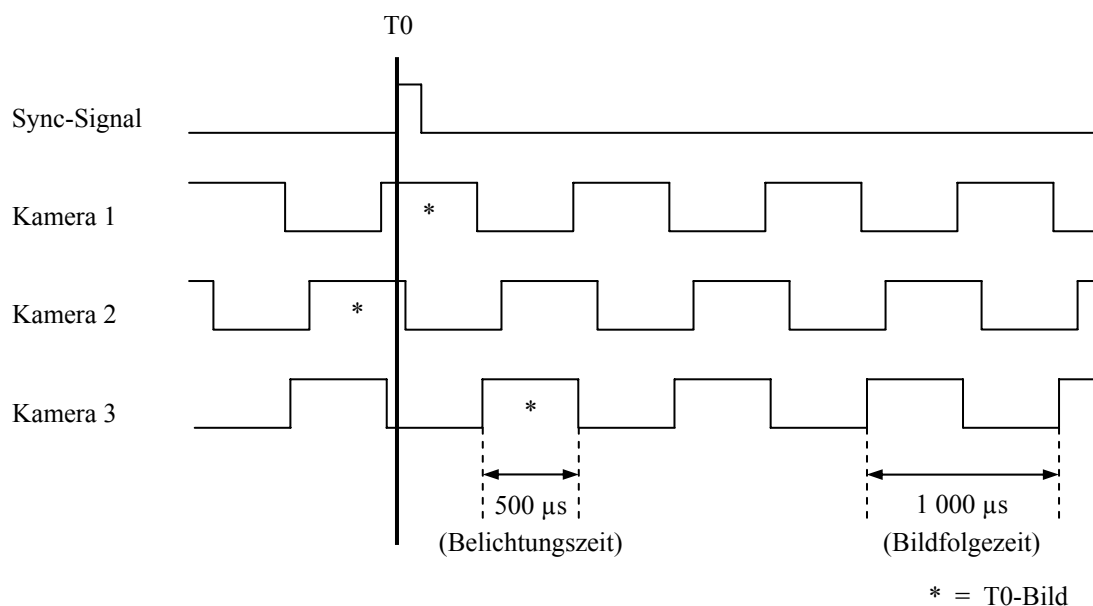


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Synchronisation der Kameras über das Frame-Sync Verfahren (Schematische Darstellung für drei Kameras)

Zum Zeitpunkt T_0 wird ein Synchronisationstriggersignal von der zentralen Steuereinheit zu allen Kameras gesendet. Das zum Zeitpunkt der Signalübertragung aufgenommene Bild der jeweiligen Kamera erhält dann den Zeitstempel für T_0 . Wird zum Zeitpunkt der Signalübertragung gerade kein Bild aufgenommen, erhält das nächste Bild, das aufgenommen wird, den Zeitstempel für T_0 . In Abbildung 4-9 sind die jeweiligen T_0 -Bilder mit einem * gekennzeichnet. Es kann bei diesem Synchronisationsverfahren dazu kommen, dass eine Kamera gerade am Anfang einer Belichtungszeit ist (Kamera 1), eine andere Kamera gerade am Ende der Belichtungszeit ist (Kamera 2) und eine weitere Kamera sich gerade in einem Status zwischen zwei Belichtungszeiten befindet (Kamera 3). Dadurch kann es bei diesem Synchronisationsverfahren durch den aktuellen internen Zustand, in dem sich die Kamera zum Zeitpunkt der Signalübertragung befindet, zu einer Asynchronität zwischen den Kameras von bis zu einem Bild kommen. Dies entspricht bei einer Aufnahmefrequenz von 1 000 Hz einer Asynchronität von bis zu 1 ms.

5 Auswertung und Analyse der Rotation der SAE-Testtafel

In dem ersten Versuch wurden Zielmarken auf einer sich drehenden SAE-Testtafel mit zwei digitalen Highspeed-Kameras beobachtet. Zur Verifizierung der berechneten Asynchronität zwischen den beiden aufgenommenen Bildsequenzen wurde im Messvolumen zusätzlich ein Synchronometer im Sichtfeld beider Kameras positioniert und darüber ein Referenzwert für die Asynchronität ermittelt.

Die Auswertung und Analyse der beiden aufgenommenen Bildsequenzen lässt sich in drei Teile gliedern. Im ersten Teil wird die Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchung ist die Bestimmung der theoretischen Genauigkeit des neuen Verfahrens sowie der direkte Vergleich zwischen den Ergebnissen der Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität.

Im zweiten Teil der Versuchsauswertung wird die empirische Genauigkeit des Verfahrens bestimmt. Da für die einzelnen Punkte auf der SAE-Testtafel zu keinem Zeitpunkt der Sequenz Sollkoordinaten in einem ortsfesten Koordinatensystem vorliegen, kann kein direkter Soll-Ist Vergleich der Objektkoordinaten durchgeführt werden. Stattdessen können Strecken auf der SAE-Testtafel für die Bewertung genutzt werden, deren Soll-Längen bekannt sind. Über den Vergleich der berechneten Längen für jeden Zeitpunkt der Sequenz mit den Soll-Längen kann somit eine Aussage zur empirischen Genauigkeit des Verfahrens getroffen werden.

Im dritten Teil der Auswertung wird untersucht, wie viele Bilder mindestens notwendig sind um mit dem Verfahren die korrekte Asynchronität und die exakten Objektkoordinaten ermitteln zu können. Dafür wird die Anzahl der auszuwertenden Bilder systematisch reduziert und die Auswirkungen dieser Reduzierung auf die Ergebnisse analysiert.

Sowohl zur Bestimmung des Referenzwerts für die Asynchronität als auch für die drei Auswertungen wurden die gleichen Bildsequenzen der sich drehenden SAE-Testtafel genutzt. Bei den Auswertungen mit Berücksichtigung der Asynchronität wurde jeweils die Sequenz der linken der beiden Kameras als Referenz für den Zeitbezug genutzt.

5.1 Bestimmung eines Referenzwerts für die Asynchronität

Zur Verifizierung der berechneten Asynchronität zwischen den beiden aufgenommenen Bildsequenzen wird ein Referenzwert für die Asynchronität benötigt. Dieser wird über ein Synchronometer (siehe Abschnitt 2.3.3.3) ermittelt, das im Messvolumen im Sichtfeld beider Kameras positioniert wurde. Anhand der leuchtenden LEDs des Anzeigefelds des Synchronometers kann die aktuelle Systemzeit zu jedem Bild der beiden Sequenzen exakt bestimmt werden. Die Asynchronität zwischen den Bildsequenzen lässt sich dann direkt aus den ermittelten Systemzeiten ableiten.

Bei diesem Versuch wurde das Synchronometer mit einer zeitlichen Auflösung von 0.01 ms betrieben. Die Systemzeit aller Bilder der zwei aufgenommen Bildsequenzen wurde mit Hilfe des Synchronometers ermittelt. Aus diesen Werten wurde im Folgenden die Asynchronität der beiden Bildsequenzen für jeden Zeitpunkt der Sequenz berechnet (siehe Abbildung 5-1).

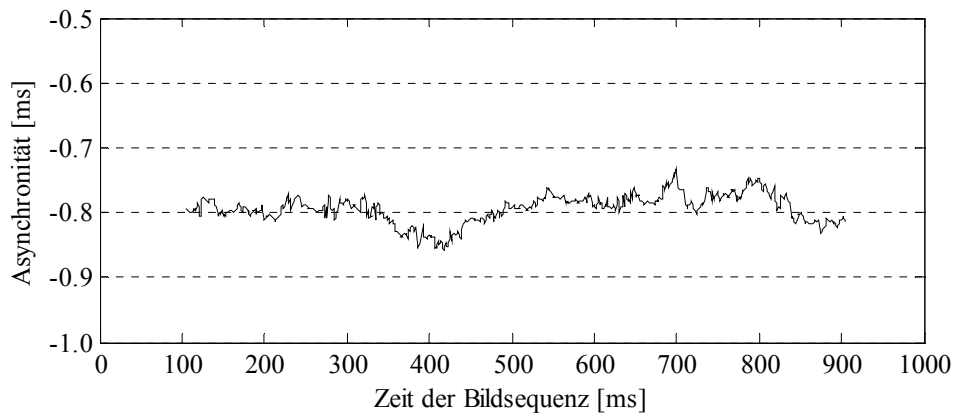


Abbildung 5-1: Asynchronität zwischen den beiden Sequenzen über den gesamten Zeitraum der Bildsequenz, berechnet aus der in jedem Bild der beiden Sequenzen dargestellten Systemzeit des Synchronometers

Der aus den Analysen der Messwerte des Synchronometers ermittelte Referenzwert für die Asynchronität zwischen den beiden Sequenzen zeigt einen konstanten zeitlichen Versatz von im Mittel -0.79 ms mit einer Standardabweichung des Einzelwerts von 0.02 ms. In Abbildung 5-1 ist deutlich zu sehen, dass die Messwerte leicht verrauscht sind. Allerdings lassen sich daraus keine Effekte unterschiedlicher Aufnahmefrequenzen oder einer zeitlichen Drift einer Aufnahmefrequenz ableiten. Mit Hilfe von Formel (2.2) kann bei der vorliegenden Aufnahmekonstellation die Auswirkung einer Asynchronität von 0.02 ms abgeschätzt werden. Die Auswirkung der Asynchronität quer zur Aufnahmerichtung liegt bei ca. 0.03 mm und in Aufnahmerichtung beträgt sie ca. 0.4 mm. Beide Werte sind vernachlässigbar klein. Das Ergebnis dieser Messung ist somit ausreichend genau um als Referenz für die Bewertung des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität in den weiteren Untersuchungen genutzt werden zu können.

5.2 Bestimmung der theoretischen Genauigkeit

Zur Beurteilung der theoretischen Genauigkeit wurden die Messungen in den beiden Bildsequenzen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität ausgewertet. Die Kameras nehmen bei diesem Versuch Sequenzen von jeweils $1\,000$ ms auf. Während dieser Zeit vollzieht die SAE-Testtafel ca. 1.1 Drehungen.

Für die Analysen werden ohne Einschränkung der Allgemeinheit die Ergebnisse eines Objektpunkts auf der SAE-Testtafel detailliert betrachtet. Der Objektpunkt ist der Punkt C12. Im Folgenden werden drei spezielle Positionen seiner Trajektorie im Bild genauer untersucht und bewertet. Diese drei Positionen werden entsprechend ihrer Lage auf der Trajektorie im Bild als *Oben*, *Mitte* und *Unten* bezeichnet (siehe Abbildung 5-2). Durch die Ausrichtung der Tafel und die Festlegung des Objektkoordinatensystems bewegt sich der Punkt C12 in einer Ebene parallel zur XY -Ebene, so dass sich seine Z -Komponente über den gesamten Auswertezeitraum praktisch nicht ändert.

In Abbildung 5-2 ist unten rechts das Anzeigefeld des Synchronometers zu sehen (blauer Rahmen), dessen Messwerte zur Bestimmung eines Referenzwerts für die Asynchronität genutzt wurden.

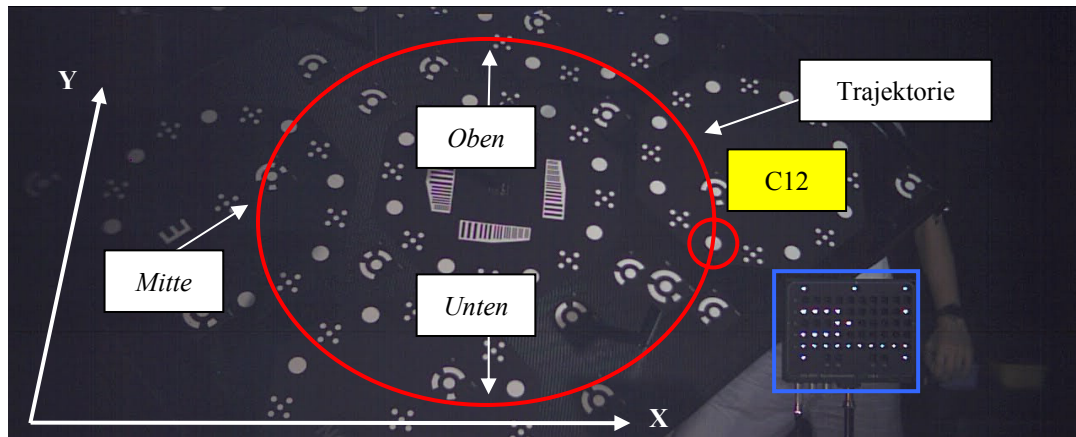
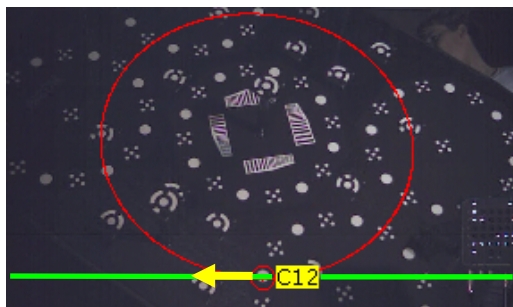
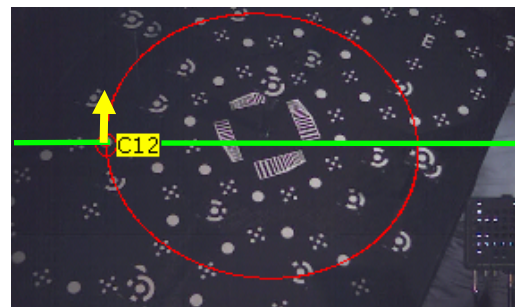


Abbildung 5-2: Bild aus einer Sequenz mit der Darstellung des übergeordneten Koordinatensystems, der Trajektorie des Objektpunkts C12 im Bild mit den drei analysierten Positionen *Oben*, *Mitte* und *Unten* sowie dem Anzeigefeld des Synchronometers (blauer Rahmen)

In Abbildung 5-3 ist die Lage des Objektpunkts C12 in den Positionen *Unten* und *Mitte* dargestellt. Des Weiteren ist die Bewegungsrichtung des Punkts jeweils durch einen gelben Pfeil gekennzeichnet. Die grüne Linie ist jeweils die Epipolarlinie des Punkts zu dem abgebildeten Zeitpunkt.



a) Position *Unten*



b) Position *Mitte*

Abbildung 5-3: Bilder der Sequenz zu den Positionen *Unten* und *Mitte* des Objektpunkts C12 im Bild sowie der Darstellung der Bewegungsrichtung des Punkts (gelber Pfeil) und der zugehörigen Epipolarlinie (grüne Linie)

5.2.1 Bildsequenzauswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität

Zunächst wurden die beiden Bildsequenzen in einer Bündelausgleichung ohne Berücksichtigung der Asynchronität ausgewertet. Die Auswertung erfolgte in diesem Fall separat für jeden Zeitschritt. Die dreidimensionale Trajektorie des Objektpunkts C12 im Objektraum entsteht durch die Aneinanderreihung der Ergebnisse der Auswertungen der einzelnen Zeitschritte.

Die Auswirkungen der Asynchronität auf die Objektkoordinatenbestimmung hängen unter anderem von der Bewegungsrichtung des Objekts ab (siehe Abschnitt 2.1). Bewegt sich das Objekt innerhalb der Epipolarebene, so wirkt sich die Asynchronität ausschließlich als systematische Verschiebung innerhalb dieser Ebene aus. Bewegt sich das Objekt dagegen nicht innerhalb der Epipolarebene, bewirkt die Asynchronität eine Vergrößerung der Standardabweichungen der berechneten Objektkoordinaten. Der Effekt der Asynchronität auf die Objektkoordinatenbestimmung in Form einer systematischen Verschiebung hängt direkt vom Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Objektpunkts im Bild und der Epipolarlinie im Bild ab.

Der Effekt einer systematischen Verschiebung innerhalb der Epipolarebene ist für den Objektpunkt C12 in Abbildung 5-4 dargestellt. Im linken Teil der Abbildung ist die Aufnahmekonstellation schematisch skizziert. Die gestrichelte Linie stellt die Ebene dar, in der die SAE-Testtafel rotiert, also die Ebene die alle Sollpositionen des Objektpunkts C12

zu den verschiedenen Zeitpunkten aufspannen. Die durchgezogene Linie zeigt die Ebene an, die durch die berechneten Koordinaten des Objektpunkts C12 zu den einzelnen Zeitpunkten entsteht. Die drei Positionen *Oben*, *Unten* und *Mitte* sind speziell gekennzeichnet.

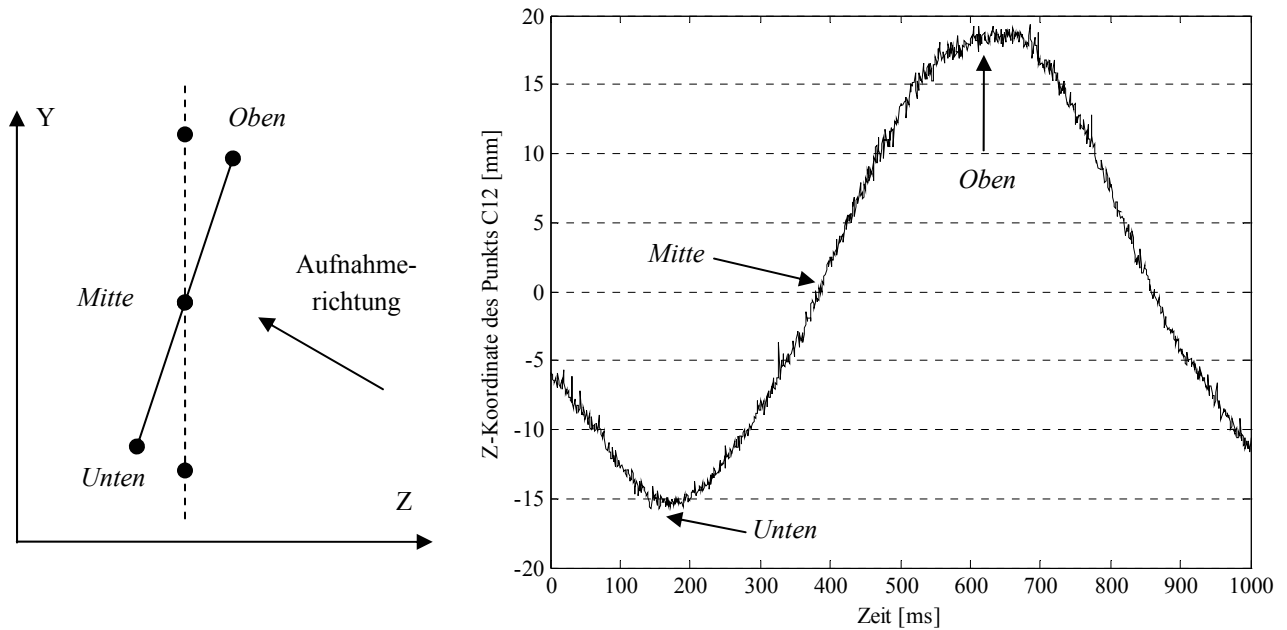


Abbildung 5-4: Systematische Verschiebung des Objektpunkts C12 in der Epipolarebene durch die Vernachlässigung der Asynchronität im Rahmen der Auswertung, links: schematische Darstellung, rechts: Z-Koordinate des Objektpunkts als Ergebnis der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität

Die Vernachlässigung der Asynchronität bewirkt an den Positionen *Oben* und *Unten*, an denen sich der Objektpunkt annähernd innerhalb der Epipolarebene bewegt (siehe Abbildung 5-3a), eine systematische Verschiebung des Objektpunkts in Aufnahme-richtung. In Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung des Objekts liegt der berechnete Objektpunkt vor oder hinter seiner Soll-Position (siehe Positionen *Oben* und *Unten* in Abbildung 5-4). Die ermittelte Asynchronität der Referenzmessung liegt bei -0.79 ms und der Objektpunkt C12 bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 2.9 m/s. Das bedeutet, dass sich der Objektpunkt zwischen den beiden als zeitgleich angenommenen Aufnahmen um ca. 2.3 mm bewegt hat. Die mit Formel (2.2) abgeschätzte systematische Verschiebung an den Positionen *Oben* und *Unten* beträgt ca. 1 mm senkrecht zur Aufnahme-richtung und ca. 16 mm in Aufnahme-richtung. Durch den Winkel von etwa 30° zwischen der Z-Achse des übergeordneten Koordinatensystems und der Aufnahme-richtung wirkt sich die systematische Verschiebung aufgrund der Vernachlässigung der Asynchronität auf die Y- und die Z-Koordinate des Objektpunkts aus. Dadurch wird der Objektpunkt um ca. 14 mm in Z-Richtung (siehe Abbildung 5-4 rechts) und um ca. 8 mm in Y-Richtung verschoben. An der Position *Mitte* der Trajektorie bewegt sich der Objektpunkt C12 senkrecht zu seiner Epipolarebene (siehe Abbildung 5-3b). Die Vernachlässigung der Asynchronität wirkt sich an dieser Position als Vergrößerung der Standardabweichung der berechneten Objektkoordinaten aus. Die ermittelte Position des Objektpunkts ist in diesem Fall korrekt.

5.2.2 Bildsequenzauswertung mit Berücksichtigung der Asynchronität

Die Auswertung der Bildsequenzen der rotierenden SAE-Testtafel wurde mit Berücksichtigung der Asynchronität wiederholt. In ersten Auswertungen wurde die Asynchronität über ein Korrekturpolynom zweiten Grades sowie über eine lineare Korrekturfunktion modelliert. Die Ergebnisse dieser beiden Auswertungen zeigen, dass die Werte für die Parameter höherer Ordnung nicht signifikant von Null verschieden sind. Das Verhältnis der Aufnahmefrequenzen Δt_{ratio} und die Drift einer Aufnahmefrequenz Δt_{Drift} müssen somit nicht modelliert werden. Dieses Ergebnis entspricht dem Ergebnis der Referenzmessung. Die Auswertung der Referenzmessung ergab ebenfalls einen konstanten Zeit-Offset Δt_{Offset} (siehe Abschnitt 5.1). Für alle weiteren Auswertungen dieses Versuchs wird daher zur Modellierung der Asynchronität ein konstanter Zeit-Offset Δt_{Offset} angesetzt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse wie in Abschnitt 5.2.1 anhand der Positionen *Oben*, *Mitte* und *Unten* der Trajektorie des Objektpunkts C12 im Bild analysiert. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 5-5 dargestellt. Die Objektkoordinaten an den drei Positionen liegen alle annähernd in der Ebene, die durch die Sollpositionen des Objektpunkts C12 zu allen Zeitpunkten entsteht (siehe Abbildung 5-5 rechts). Die Verschiebung in Z-Richtung an der Position *Oben* liegt im Bereich von maximal 5 mm. Diese Verschiebung kann durch die nicht vollständig gleichmäßige Rotation der SAE-Testtafel verursacht werden. Die berechnete Asynchronität zwischen den beiden Sequenzen liegt bei -0.78 ms mit einer Standardabweichung von 0.002 ms.

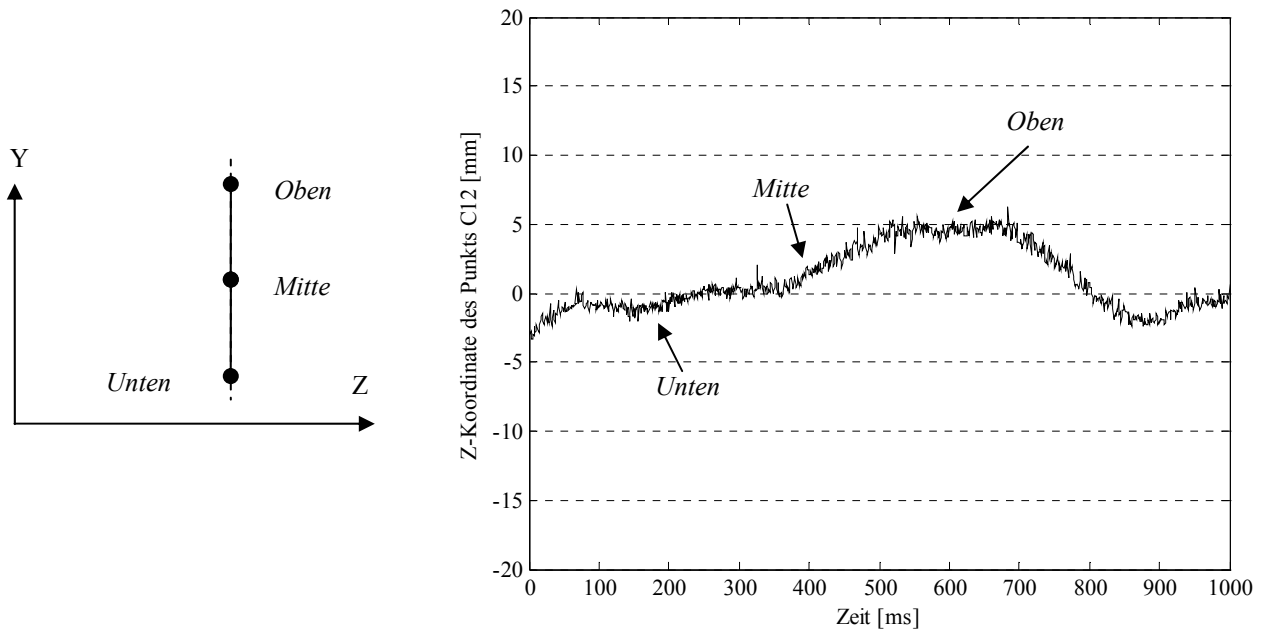


Abbildung 5-5: Ergebnisse der Auswertung des Objektpunkts C12 inklusive der Berücksichtigung der Asynchronität, links: schematische Darstellung, rechts: Z-Koordinate des Objektpunkts als Ergebnis der Auswertung mit Berücksichtigung der Asynchronität

5.2.3 Analyse und Bewertung der Ergebnisse

Die mit den beiden Verfahren berechneten Standardabweichungen für die Trajektorienposition *Mitte* des Objektpunkts C12 sind in Tabelle 5-1 zusammengestellt. Anhand der Werte ist deutlich zu erkennen, dass durch die Berücksichtigung der Asynchronität eine um den Faktor 10 bessere Standardabweichung der Objektkoordinaten des Punkts C12 erzielt wurde.

Objektpunkt C12		Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität	Auswertung mit Berücksichtigung der Asynchronität
s_0		7.2 μm (0.60 Pixel)	0.7 μm (0.06 Pixel)
Asynchronität		./.	-0.78 ms
<i>Mitte</i>	σ_x	1.86 mm	0.17 mm
	σ_y	5.25 mm	0.49 mm
	σ_z	8.37 mm	0.77 mm

Tabelle 5-1: Vergleich der Standardabweichungen der Gewichtseinheit a posteriori und der Objektkoordinaten des Punkts C12 berechnet über eine Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität für die Position *Mitte*

Die Unterschiede zwischen den mit den beiden Verfahren ermittelten Objektkoordinaten sind für die gesamte Bildsequenz in Abbildung 5-6 dargestellt. Die starke Korrelation zwischen der Asynchronität und der systematischen Verschiebung des Objektpunkts in Aufnahme­richtung entsteht durch die gewählte Aufnahmekonstellation und die Bewegungsrichtung des Objektpunkts C12 in Bezug zu seiner Epipolarebene.

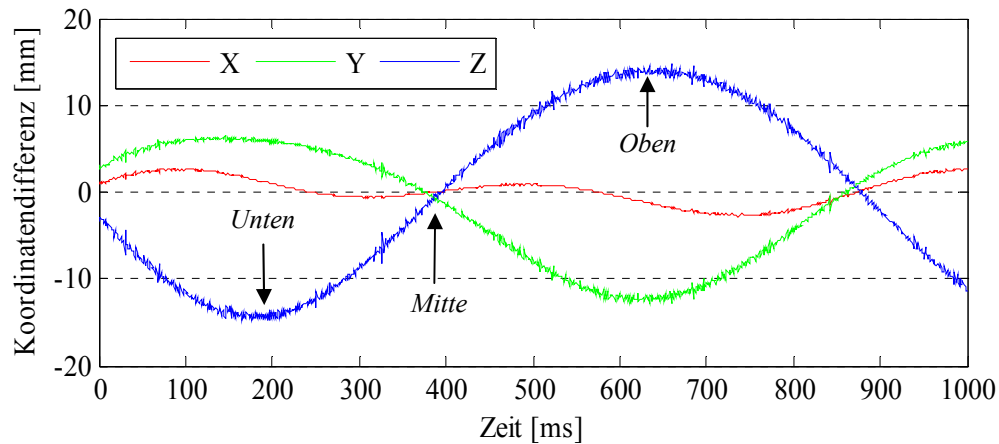


Abbildung 5-6: Differenz der mit den beiden Auswerteverfahren berechneten Objektkoordinaten des Punkts C12 über den gesamten Zeitbereich der Auswertung von 1 000 ms

Durch die Modellierung der Asynchronität konnten zum einen die korrekten Koordinaten des Objektpunkts bestimmt werden und zum anderen konnten die theoretischen Standardabweichungen der Koordinaten um den Faktor 10 verbessert werden. Die Auswertung mit dem Verfahren zur Berücksichtigung der Asynchronität ergab eine Asynchronität zwischen den Bildsequenzen von -0.78 ms mit einer Standardabweichung von 0.002 ms. Der Referenzwert für die Asynchronität, der durch den Einsatz des Synchronometers ermittelt wurde, liegt bei -0.79 ms mit einer Standardabweichung des Einzelwerts von 0.02 ms. Die berechnete Asynchronität weist somit keine signifikanten Unterschiede zum Referenzwert auf.

5.3 Bestimmung der empirischen Genauigkeit

Im zweiten Teil der Auswertung wird die empirische Genauigkeit des Verfahrens ermittelt und bewertet. Da zu keinem Zeitpunkt der Sequenz Soll-Koordinaten eines Objektpunkts bekannt sind, erfolgt dazu ein Soll-Ist Vergleich einer Strecke zwischen zwei Objektpunkten auf der SAE-Testtafel. Die zu analysierte Strecke befindet sich auf der SAE-Testtafel zwischen den beiden Objektpunkten B12 und C12 (siehe Abbildung 5-7).

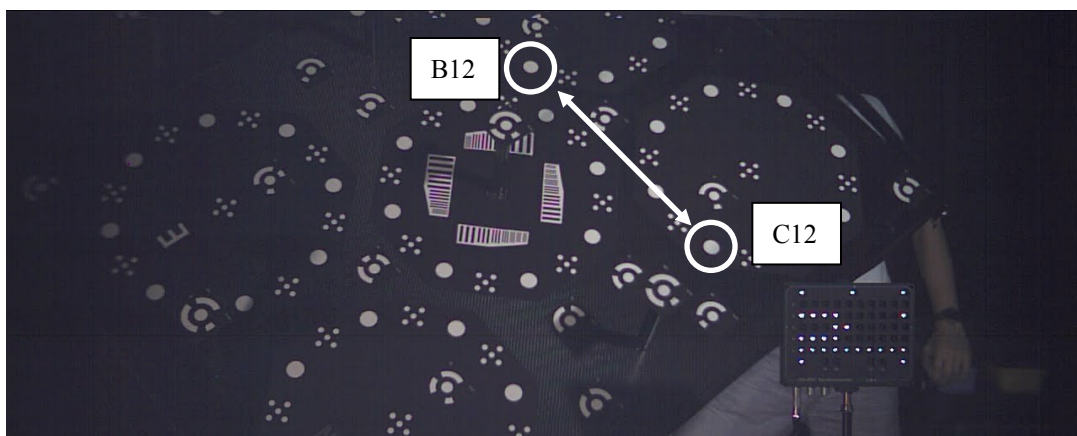


Abbildung 5-7: Bild aus einer Sequenz mit der Referenzstrecke zwischen den beiden Objektpunkten B12 und C12

Die Strecke zwischen den Objektpunkten B12 und C12 liegt nicht symmetrisch zum Drehzentrum der Tafel, und das Drehzentrum der SAE-Testtafel liegt auch nicht auf dieser Strecke. Die Länge der Strecke ist während des analysierten Zeitbereichs konstant. Somit liefert die Differenz zwischen der Referenzlänge und der im Rahmen der Auswertung berechneten Länge der Strecke einen Wert für die empirische Genauigkeit des Verfahrens. Die Länge der Referenzstrecke wurde aus den kalibrierten Objektkoordinaten der SAE-Testtafel bestimmt und beträgt 520.16 mm mit einer Standardabweichung von 0.01 mm.

5.3.1 Bildsequenzauswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität

Die Koordinaten der beiden Objektpunkte B12 und C12 wurden für jeden Zeitschritt der Bildsequenz ermittelt. Die Auswertung wurde sowohl ohne Berücksichtigung der Asynchronität als auch mit dem neuen Verfahren durchgeführt. Aus den ermittelten Objektkoordinaten wurden im Anschluss für jeden Zeitschritt die Länge der Strecke zwischen B12 und C12 berechnet. Die Ergebnisse der Streckenlängenberechnung über die gesamte Sequenz von 1 000 Bildern sind in Abbildung 5-8 dargestellt.

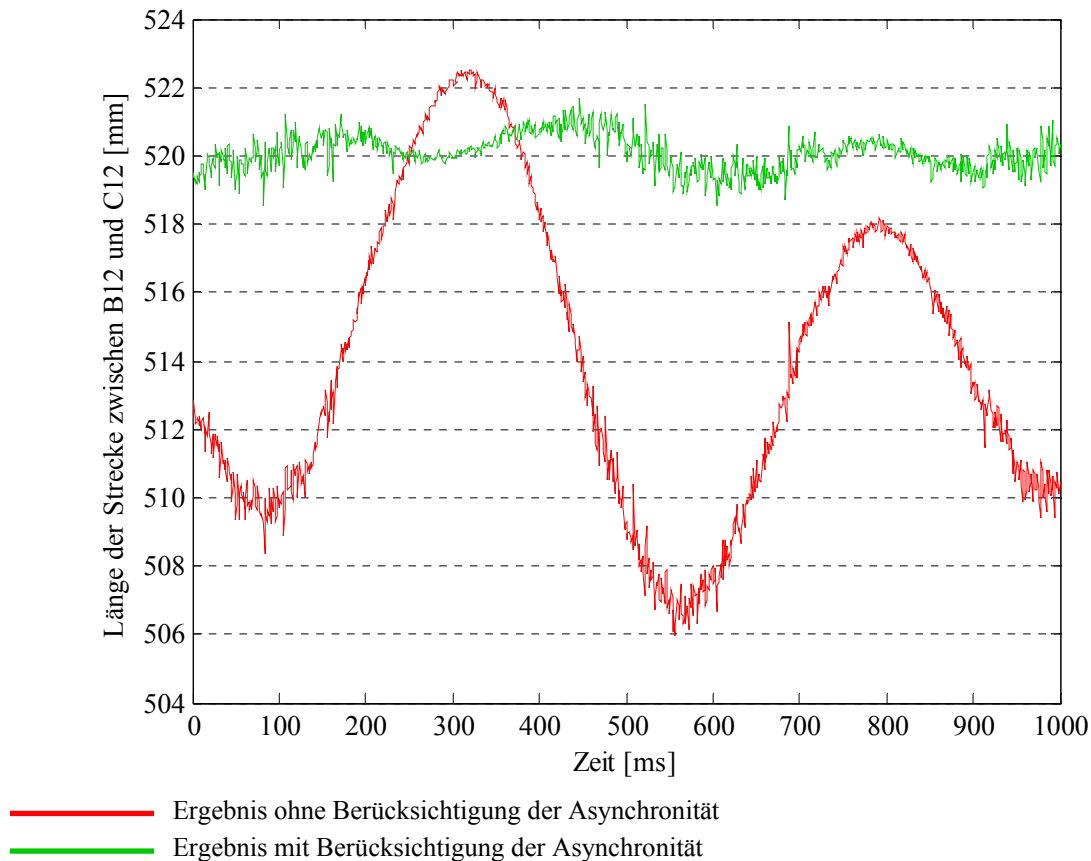


Abbildung 5-8: Länge der Referenzstrecke zwischen B12 und C12 im analysierten Zeitintervall von 1 000 Bildern, berechnet mit (grüne Kurve) und ohne (rote Kurve) Berücksichtigung der Asynchronität in der Ausgleichung

Die Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität führt zu einer signifikanten und systematischen Längenänderung der Referenzstrecke (siehe rote Kurve in Abbildung 5-8). Die maximale Differenz zur Soll-Länge der Referenzstrecke beträgt 14 mm. Der Effekt der Asynchronität in Bezug zur Bewegungsrichtung des Objekts lässt sich deutlich anhand der Abbildung erkennen und wird im Folgenden detailliert untersucht.

Mit Ausnahme der Konstellation, in der die Bewegungsrichtung eines Objektpunkts senkrecht zur Epipolarebene verläuft, wird jeder Objektpunkt bei der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität stets um einen gewissen Betrag in Aufnahme-richtung verschoben. Diese Verschiebungen treten bis auf wenige Zeitschritte stets bei beiden

Objektpunkten auf und bewirken eine systematische Änderung der Länge der Referenzstrecke, die in Abbildung 5-8 (rote Kurve) deutlich als sinusförmiger Kurvenverlauf zu erkennen ist. Die Form des Verlaufs ist abhängig von der Aufnahmekonstellation, der Bewegungsrichtung und der Geschwindigkeit der beiden Objektpunkte. Aufgrund der unterschiedlichen Entfernungen der Objektpunkte B12 und C12 zum Drehzentrum der SAE-Testtafel haben sie unterschiedliche Geschwindigkeiten. Der Punkt B12 liegt näher am Drehzentrum und hat eine Geschwindigkeit von 2.1 m/s im Gegensatz zum Punkt C12, der sich mit einer Geschwindigkeit von 2.9 m/s bewegt.

5.3.2 Analyse und Bewertung der Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität detailliert analysiert. Die Maxima und Minima der in Abbildung 5-8 gezeigten Längenänderung der Referenzstrecke (rote Kurve) werden untersucht. Die zu den vier Extremwerten zugehörigen Bilder der jeweils linken Sequenz sind in Abbildung 5-9 dargestellt. In den Abbildungen ist neben den Trajektorien (rote Kreise) der beiden Objektpunkte B12 und C12 im Bild auch die Lage der Referenzstrecke (grüne Linie) zu den entsprechenden Zeitpunkten markiert.

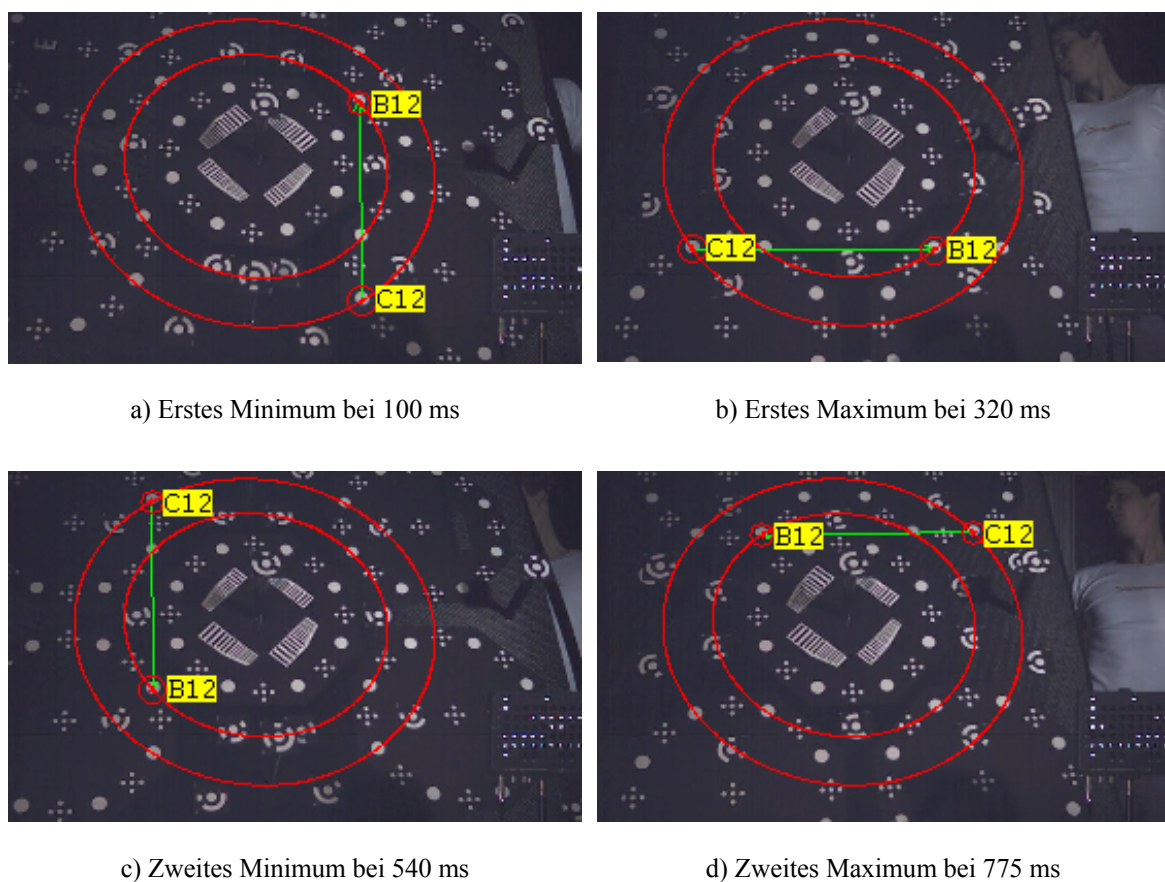


Abbildung 5-9: Bilder der Sequenz zu den vier Extremwerten der Streckenlängenberechnung ohne Berücksichtigung der Asynchronität mit den Trajektorien (rote Kreise) sowie der Lage der zu untersuchenden Strecke zwischen den Objektpunkten B12 und C12 (grüne Linie)

Die beiden Minima der Kurve (siehe Abbildung 5-9a und c) treten zu den Zeitpunkten auf, an denen die Referenzstrecke etwa senkrecht zu den beiden Epipolarebenen der Objektpunkte ausgerichtet ist. Zu diesen Zeitpunkten werden die beiden Objektpunkte B12 und C12 durch die Vernachlässigung der Asynchronität bei der Auswertung systematisch verschoben. Die Richtung der Verschiebung ist von der Konstellation der Objektbewegungsrichtung in Relation zu den Kameras abhängig. Dieser Zusammenhang lässt sich vereinfacht anhand der Verschiebung eines Objektpunkts beschreiben und ist schematisch in Abbildung 5-10 dargestellt. Die Sequenz der linken Kamera stellt bei der Auswertung dieses Versuchs die Referenz für den Zeitbezug dar. Die ermittelte Asynchronität von -0.78 ms bedeutet somit, dass die rechte Kamera die Objektbewegung um 0.78 ms früher aufnimmt als die linke Kamera. Die

SAE-Testtafel dreht sich, aus Richtung der Kameras betrachtet, im Uhrzeigersinn. Dass bedeutet, dass sich ein Objektpunkt an der Position *Oben* in Bezug zu den Kameras von links nach rechts und an der Position *Unten* entsprechend von rechts nach links bewegt. Die beiden Konstellationen und die sich daraus ergebenden unterschiedlichen Richtungen der Verschiebung sind in Abbildung 5-10 dargestellt.

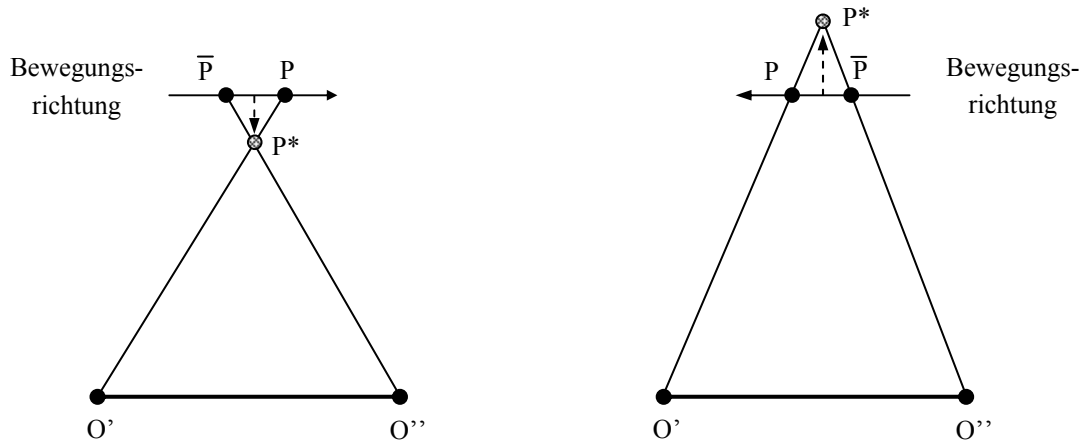


Abbildung 5-10: Schematische Darstellung des Verschiebungseffekts auf die Objektpunktbestimmung in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung des Objekts, links: Konstellation für die Position *Oben*, rechts: Konstellation für die Position *Unten*

Entsprechend der Versuchskonstellation nimmt die rechte Kamera O'' die Bewegung des Objektpunkts zu einem früheren Zeitpunkt auf. Die Positionen P und $\bar{P}$ sind jeweils die Positionen, zu denen die Kameras O' und O'' den Objektpunkt P erfassen. Die Position P^* ist die Position die ohne die Berücksichtigung der Asynchronität bei der jeweiligen Konstellation berechnet wird. Entsprechend der Bewegungsrichtung ergibt sich somit für die Position *Oben* eine systematische Verschiebung in Richtung der Kameras und für die Position *Unten* eine Verschiebung in die entgegengesetzte Richtung (siehe Abbildung 5-10).

Bei der Betrachtung der Referenzstrecke ergibt sich daraus, dass der obere Endpunkt der Strecke jeweils in Richtung der Kameras verschoben wird und der untere Endpunkt jeweils in die entgegengesetzte Richtung (siehe Abbildung 5-11).

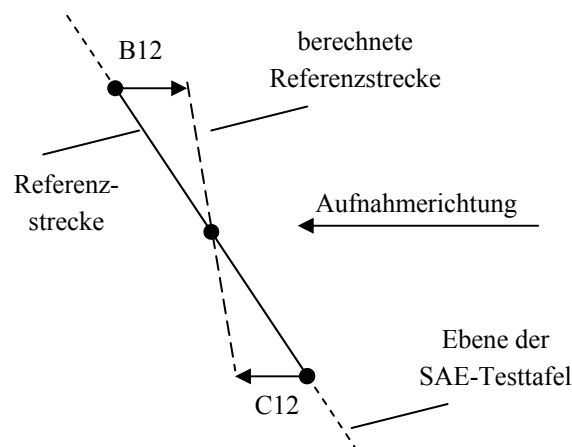


Abbildung 5-11: Schematische Darstellung des Verschiebungseffekts durch die Vernachlässigung der Asynchronität bei der Auswertung beim ersten Minimum der Streckenlängenberechnung bei 100 ms, die Referenzstrecke steht zu diesem Zeitpunkt senkrecht zu den Epipolarebenen der beiden Objektpunkte $B12$ und $C12$

Aufgrund der systematischen Verschiebung durch die Vernachlässigung der Asynchronität wird gemäß Abbildung 5-11 eine zu kurze Länge für die Referenzstrecke berechnet. Die durch die verschiedenen Abstände der Objektpunkte B12 und C12 zum Drehzentrum der SAE-Testtafel zu erklärenden unterschiedlichen Geschwindigkeiten der beiden Objektpunkte führen zu unterschiedlich großen Minima in der Streckenlängenberechnung (siehe Abbildung 5-8). Befänden sich die beiden Objektpunkte in gleicher Entfernung zum Drehzentrum, würden sie sich auch mit gleicher Geschwindigkeit bewegen und die beiden Minima der Streckenlängenberechnung wären identisch.

Die beiden Maxima der Referenzlängenberechnung (siehe Abbildung 5-9b und d) treten zu den Zeitpunkten auf, an denen die Referenzstrecke annähernd innerhalb der Epipolarebenen der beiden Objektpunkte B12 und C12 liegt. Bei dem ersten Maximum werden beide Objektpunkte von den Kameras weg verschoben und eine zu lange Strecke wird berechnet. Bei dem zweiten Maximum der Streckenlängenberechnung werden beide Punkte in Richtung auf die Kameras hin verschoben. Dadurch ist die berechnete Länge der Strecke zu kurz. Bei dieser Konstellation weisen beide Maxima annähernd den gleichen Abstand zum wahren Wert der Strecke auf. Beim ersten Maximum ist die ermittelte Streckenlänge um ca. 2 mm zu lang und beim zweiten Maximum ist die Länge entsprechend um 2 mm zu kurz berechnet.

Die Auswertung der Bildsequenzen mit Berücksichtigung der Asynchronität ergibt eine Asynchronität zwischen den beiden Sequenzen von -0.78 ms mit einer Standardabweichung von 0.002 ms. Der ermittelte Wert zeigt keinen signifikanten Unterschied zum Referenzwert für die Asynchronität von -0.79 ms (siehe Abschnitt 5.1). Der berechnete Mittelwert für die Referenzstrecke über die gesamte Bildsequenz liegt bei 520.15 mm mit einer Standardabweichung des Einzelwerts von 0.51 mm (siehe grüne Kurve in Abbildung 5-8). Der Unterschied zur kalibrierten Länge der Referenzstrecke von 0.01 mm ist nicht signifikant und kann vernachlässigt werden. Die Änderungen der ermittelten Länge zeigen einen leicht systematischen Verlauf (siehe Abbildung 5-8). Dies kann auf eine nicht vollständig konstante Asynchronität zwischen den beiden Bildsequenzen zurückgeführt werden. Die in Abschnitt 5.1 ermittelten Referenzwerte zeigten ebenfalls leicht verrauschte Messwerte und eine nicht vollständig konstante Asynchronität (siehe Abbildung 5-1).

Durch die Berücksichtigung der Asynchronität im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung von asynchron aufgenommenen Bildsequenzen konnte die Länge der Referenzstrecke zwischen den Objektpunkten B12 und C12 korrekt berechnet werden. Ohne die Berücksichtigung der Asynchronität wird eine falsche Streckenlänge bestimmt und es werden, je nach Orientierung der Referenzstrecke zu den Epipolarebenen der beiden Objektpunkte, systematische Längenänderungen von bis zu 14 mm ermittelt.

5.4 Reduzierung der Anzahl der aufeinander folgenden Bilder

In den vorherigen Auswertungen wurden stets alle 1 000 aufeinander folgenden Bilder der Sequenzen genutzt. Das Ziel der folgenden Untersuchung ist die Bestimmung der minimal notwendigen Anzahl aufeinander folgenden Messungen bei der die Asynchronität noch korrekt ermittelt werden kann, d.h. die Bewegungsrichtung der verbleibenden Messungen nicht ausschließlich innerhalb der Epipolarebene liegt.

Für diese Auswertung wird die Anzahl der aufeinander folgenden Bildkoordinatenmessungen der beiden Objektpunkte B12 und C12, die die Referenzstrecke bilden, systematisch auf 200, 100, 50, 20, 10 und 5 Bilder reduziert. Die jeweiligen Stichproben wurden zu verschiedenen, jeweils gleichverteilten, Zeitpunkten innerhalb der gesamten Sequenz selektiert. So wurden beispielsweise mit dem Stichprobenumfang von 50 Bildern insgesamt 150 Auswertungen zu verschiedenen gleichmäßig verteilten Zeitpunkten innerhalb der Sequenz durchgeführt. Die berechnete Asynchronität streute bei diesen Auswertungen von -0.72 ms bis -0.86 ms und die berechnete Länge der Referenzstrecke variierte von 519.07 mm bis 521.20 mm. Die Ergebnisse aller reduzierten Stichproben an den verschiedenen Positionen innerhalb der Sequenz sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst. Die größte analysierte Stichprobe ist bei dieser Untersuchung eine komplette Drehung der SAE-Testtafel, die 910 Bilder lang ist.

Anzahl Bilder	Anzahl verschiedener Positionen	Berechnete Asynchronität [ms]		Länge der Strecke B12 zu C12 [mm]	
		min	max	min	max
910	1	-0.78		520.16	
200	40	-0.74	-0.83	519.59	520.33
100	80	-0.73	-0.85	519.17	520.98
50	150	-0.72	-0.86	519.07	521.10
20	450	-0.71	-0.87	518.87	521.32
10	900	-0.70	-0.88	518.68	521.51
5	900	-0.69	-0.91	518.56	521.70

Tabelle 5-2: Auswirkungen der Reduzierung der Anzahl aufeinander folgender Messungen auf die berechnete Asynchronität und auf die ermittelte Länge der Strecke zwischen den Objektpunkten B12 und C12

Anhand der Werte in Tabelle 5-2 ist deutlich zu erkennen, dass sich die Ergebnisse durch die Reduzierung der Anzahl der aufeinander folgenden Bilder nur leicht verschlechtern. Die Änderungen der berechneten Asynchronität betragen bei einer Reduzierung auf eine Stichprobengröße von fünf aufeinander folgenden Bildern in einem Bereich von ± 0.1 ms. Die Änderungen in der Länge der Referenzstrecke zwischen B12 und C12 liegen bei dieser Stichprobengröße im Bereich von ± 1.5 mm.

Bei der Stichprobengröße von fünf aufeinander folgenden Bildern wurden 900 Auswertungen zu verschiedenen gleichverteilten Zeitpunkten innerhalb der Sequenz durchgeführt. In Abbildung 5-12 ist die jeweils berechnete Asynchronität dargestellt. Anhand der Kurve ist deutlich zu erkennen, dass die berechnete Asynchronität leicht variiert. Diese Variation zeigt aber keinen systematischen Verlauf, der auf eine Abhängigkeit der ermittelten Asynchronität von der Bewegungsrichtung der beiden Objektpunkte zurückzuführen ist.

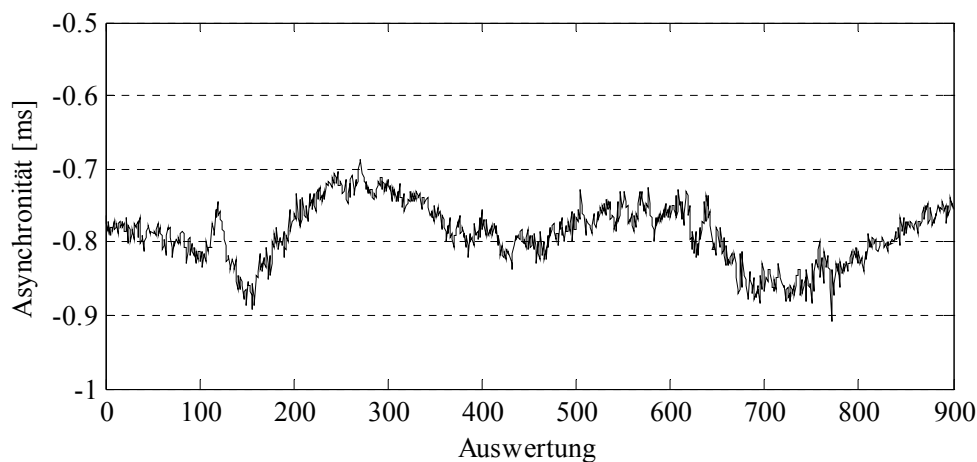


Abbildung 5-12: Berechnete Asynchronität einer Stichprobe von fünf aufeinander folgenden Bildern, deren Position innerhalb des gesamten Auswertintervalls variiert wurde (insgesamt 900 Auswertungen)

Durch die Reduzierung der Anzahl aufeinander folgender Messungen auf nur fünf Zeitschritte verschlechtern sich die Ergebnisse der Auswertung nicht signifikant. Zu jedem Auswertezeitpunkt liegt die Bewegungsrichtung mindestens einer der beiden Punkte B12 und C12 der Referenzstrecke außerhalb der Epipolarebene. Dadurch wird die kritische Konstellation, dass sich alle betrachteten Auswertezeitpunkte innerhalb der Epipolarebene bewegen, vermieden.

5.5 Zusammenfassung der Analysen und Bewertung des ersten Versuchs

Bei dem ersten Versuch wurde eine sich drehende SAE-Testtafel mit zwei digitalen Highspeed-Kameras aufgenommen. Die gesamte Bildsequenz besteht aus 1 000 Bildern und wurde mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität ausgewertet und analysiert.

Im ersten Teil der Auswertung wurde die theoretische Genauigkeit bestimmt. Durch die Berücksichtigung der Asynchronität konnte diese mit -0.78 ms korrekt ermittelt werden. Der Unterschied von 0.01 ms zum Referenzwert ist vernachlässigbar. Die theoretischen Standardabweichungen der berechneten Objektkoordinaten konnten bei diesem Versuch im Vergleich zur den Ergebnissen der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität um den Faktor 10 verbessert werden. Eine systematische Verschiebung der Objektpunkte in der Epipolarebene als Auswirkung der Asynchronität konnte praktisch vollständig eliminiert werden, sodass die korrekten Positionen der Objektkoordinaten bestimmt wurden.

Im zweiten Teil der Auswertung wurde die empirische Genauigkeit überprüft. Dazu wurde die Länge einer Strecke zwischen zwei Objektpunkten auf der SAE-Testtafel über die gesamte Bildsequenz analysiert und mit der Referenzlänge verglichen. Bei der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität lagen die systematischen Längenänderungen der ca. 520 mm langen Referenzstrecke im Bereich von bis zu 14 mm. Die Auswertung mit Berücksichtigung der Asynchronität zeigte keine großen Längenänderungen der Referenzstrecke. Der Mittelwert der berechneten Strecke ergab eine Abweichung von 0.01 mm zum Referenzwert, die vernachlässigt werden kann. Die Standardabweichung des Einzelwerts, die als empirische Genauigkeit des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität bei diesem Versuch angesetzt werden kann, liegt bei ca. 0.5 mm.

Im dritten Teil der Auswertung wurden die Auswirkungen der Reduzierung der Anzahl aufeinander folgender Bilder auf die Berechnung der Asynchronität und auf die Bestimmung der Streckenlänge betrachtet. Aufgrund der Konstellation zwischen der Bewegungsrichtung und den jeweiligen Epipolarebenen trat bei diesem Versuch bei einer Reduzierung auf fünf aufeinander folgende Zeitschritte eine Variation in der Asynchronität von ± 0.1 ms und eine Variation von ± 1.5 mm in der Länge der Strecke auf, die bei dieser Versuchskonstellation tolerierbar ist.

Die Ergebnisse der Auswertung mit Berücksichtigung der Asynchronität zeigen, dass das Verfahren für die Auswertung dieses Versuchs geeignet ist. Die Standardabweichungen der ermittelten Objektkoordinaten entsprechen den Standardabweichungen, die mit einer Auswertung von synchron aufgenommenen Bildsequenzen erzielt werden. Die Auswirkungen der Asynchronität konnten praktisch vollständig eliminiert werden.

6 Auswertung und Analyse eines Sicherheitsversuchs

Bei diesem zweiten Versuch zur Verifizierung des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität wurden Bildsequenzen eines bei der Volkswagen AG durchgeführten Sicherheitsversuchs herangezogen. Die Bildsequenzen stammen von sechs räumlich um das Messvolumen verteilten digitalen Highspeed-Kameras, die über das Frame-Sync Verfahren (siehe Abschnitt 4.3.3) synchronisiert wurden. Der Versuch wurde nicht speziell für die Verifizierung des Verfahrens durchgeführt, sondern ist ein regulärer Versuch im Rahmen der Fahrzeugentwicklung. Daher liegen keine Referenzwerte für die Asynchronität, z.B. Messwerte eines Synchronometers, vor. Die Kontrolle der Ergebnisse erfolgt deswegen indirekt über den Vergleich zwischen in der Auswertung berechneten Streckenlängen am Fahrzeug und bekannten Längen dieser Strecken.

Bei der Auswertung des Versuchs werden wie in Kapitel 5 beide Auswertestrategien, mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität, angewandt und deren jeweilige Ergebnisse miteinander verglichen. Aufgrund der Aufnahmekonfiguration erfolgt die Bewegung der betrachteten Objektpunkte für einige Kameraaare über nahezu die gesamte Bildsequenz innerhalb der Epipolarebene.

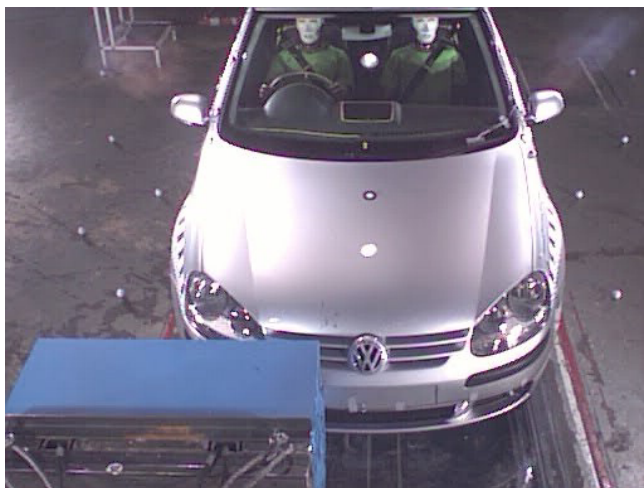
Im ersten Teil der Auswertung wird die Funktion zur Modellierung der Asynchronität festgelegt. Dazu werden Auswertungen mit verschiedenen Ansätzen zur Modellierung der Asynchronität durchgeführt, miteinander verglichen und bewertet.

Im zweiten Teil werden die ermittelten Werte für die Asynchronität auf Plausibilität getestet. Da keine Referenzwerte vorliegen, werden zur Bewertung der Ergebnisse Längen von bekannten Strecken zwischen Zielmarken am Fahrzeug herangezogen.

Im dritten und vierten Teil der Auswertung werden besondere Fragestellungen bei Sicherheitsversuchen behandelt. Dies ist einerseits die Bestimmung des minimalen Abstands zwischen zwei Komponenten, wie beispielsweise dem Dummykopf und der A-Säule des Fahrzeugs. Andererseits werden die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung mit den Ergebnissen der Simulation des Versuchs verglichen. Anhand der beiden Untersuchungen wird gezeigt, welche Auswirkung die Vernachlässigung der Asynchronitäten zwischen den Highspeed-Kameras auf die Versuchsergebnisse hat.

Bildsequenzen von sechs digitalen Highspeed-Kameras stehen für die Auswertung dieses Versuchs zur Verfügung. In Abbildung 6-1 ist jeweils das Bild der Sequenz zum Zeitpunkt T_0 (Crashbeginn) dargestellt. Die entsprechende Aufnahmekonstellation ist schematisch in Abbildung 4-6 zu sehen. Die Sequenz der Kamera O1, die den Sicherheitsversuch vom Crashblock aus erfasst, konnte nicht berücksichtigt werden, da bei den Zielmarken an den beiden A-Säulen des Fahrzeugs starke Überstrahlungseffekte auftraten (siehe Abbildung 6-1c). Dadurch konnten die Markenmittelpunkte teilweise überhaupt nicht und teilweise nur sehr ungenau gemessen werden. Für die weiteren Auswertungen und Analysen werden daher nur die Sequenzen der Kameras L1 und L3 auf der linken Seite des Fahrzeugs, die Kamera O2 sowie die Kameras R1 und R3 auf der rechten Seite des Fahrzeugs verwendet. Für die exakte Ermittlung der Asynchronität wird im Folgenden ein Zeitbereich von 70 ms, beginnend bei 50 ms vor T_0 , genutzt, da in diesem Zeitbereich noch keine Deformationen im Bereich der Zielmarken auftreten und die Marken somit optimal gemessen werden können.

Für den Aufnahmeverband wurde die Kamera O2 als Referenz ausgewählt. Aus diesem Grund beziehen sich alle ermittelten Asynchronitäten auf die Zeitbasis der Kamera O2. Diese Kamera verbindet die Messungen der beiden Kameras auf der linken Seite mit denen der beiden Kameras auf der rechten Seite, da es keine Überlappungsbereiche zwischen den Kameraaaren der linken und rechten Seite gibt.

a) Bild der Sequenz L1 bei T_0 b) Bild der Sequenz L3 bei T_0 c) Bild der Sequenz O1 bei T_0 d) Bild der Sequenz O2 bei T_0 e) Bild der Sequenz R1 bei T_0 f) Bild der Sequenz R3 bei T_0 Abbildung 6-1: T_0 -Bilder der Sequenzen der sechs Kameraansichten des Sicherheitsversuchs

6.1 Auswahl der Funktion zur Modellierung der Asynchronität

Die Asynchronität kann bei dem hier vorgestellten Verfahren mit verschiedenen Korrekturfunktionen modelliert werden. Im Rahmen der Auswertung dieses Versuchs werden zur Bestimmung der korrekten Modellierung zunächst drei verschiedene Korrekturfunktionen gewählt und die jeweiligen Parameter der Korrekturfunktionen bestimmt.

In einer ersten Untersuchung werden die Parameter der jeweiligen Funktion statistisch auf ihre Signifikanz getestet. In einer zweiten Untersuchung werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Ansätze auf die Objektkoordinaten der gemessenen Zielmarken am Fahrzeug analysiert. Des Weiteren wird in einer dritten Untersuchung die Anzahl der Bilder, die zur Bestimmung der Asynchronität genutzt werden, reduziert und an verschiedenen gleichverteilten Stellen in der Sequenz werden Auswertungen durchgeführt.

Das Ziel dieser drei Untersuchungen ist die Bestimmung der optimalen Funktion zur Modellierung der Asynchronität zwischen den Kameras des Aufnahmeverbands.

6.1.1 Statistische Untersuchung der Asynchronitätsparameter

Alle fünf Bildsequenzen wurden für die Auswertung des Fahrzeugsicherheitsversuchs genutzt. Die Asynchronität wurde zunächst mit einem Polynom zweiten Grades als Korrekturfunktion modelliert. Die drei unbekannten Parameter der Korrekturfunktion Δt_{Offset} , Δt_{Ratio} und Δt_{Drift} wurden im Rahmen der Ausgleichung für jede Kamera in Bezug zur Referenzkamera O2 bestimmt. Diese Auswertung wurde ebenfalls mit dem linearen Ansatz sowie mit dem konstanten Zeit-Offset zur Modellierung der Asynchronität durchgeführt. Die Ergebnisse der drei Auswertungen sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

Ansatz zur Modellierung	Aufnahme-Konstellation		Zeit-Offset		Verhältnis der Aufnahmefreq.		Drift der Aufnahmefreq.		S ₀
			Δt_{Offset} [ms]	S Δt_{Offset} [ms]	Δt_{Ratio} []	S Δt_{Ratio} []	Δt_{Drift} [1/ms]	S Δt_{Drift} [1/ms]	
Polynom zweiten Grades	O2	L1	-0.737	0.027	0.007	0.002	-3.7e-5	2.7e-5	3.0 μm (0.2 Pixel)
		L3	-1.613	0.033	0.005	0.002	-4.2e-5	3.1e-5	
		R1	-0.329	0.027	0.002	0.002	0.2e-5	2.7e-5	
		R3	0.012	0.028	0.003	0.002	3.3e-5	2.9e-5	
Linear	O2	L1	-0.635	0.019	-0.002	0.001	./.		3.0 μm (0.2 Pixel)
		L3	-1.577	0.022	0.002	0.001			
		R1	-0.332	0.019	0.002	0.001			
		R3	-0.012	0.019	0.005	0.001			
Konstant	O2	L1	-0.697	0.010	./.				3.2 μm (0.2 Pixel)
		L3	-1.510	0.011					
		R1	-0.258	0.010					
		R3	0.154	0.011					

Tabelle 6-1: Ergebnisse der Modellierung der Asynchronität mit einem Polynomansatz zweiten Grades, einer linearen Funktion sowie mit einem konstanten Zeit-Offset

In Tabelle 6-1 sind neben den unbekannten Parametern der Korrekturfunktion Δt_{Offset} , Δt_{Ratio} und Δt_{Drift} auch deren Standardabweichungen und die Standardabweichung der Gewichtseinheit a posteriori s_0 aufgeführt. Die Tabelle ist nach dem Modellierungsansatz in drei Blöcke unterteilt. In jedem Block sind die entsprechenden Ergebnisse der Auswertung der Kamerakonstellation O2-L1-L3-R1-R3 aufgeführt. Die Referenz stellt jeweils die Kamera O2 dar.

Die Auswertung über ein Polynom zweiten Grades zeigt, dass die für den quadratischen Term (Drift der jeweiligen Aufnahmefrequenz Δt_{Drift}) berechneten Werte nicht signifikant von Null verschieden sind. Bei der Auswertung mit einer

linearen Korrekturfunktion und einem konstanten Zeit-Offset sind die jeweiligen Parameter der Korrekturfunktionen signifikant bestimmt worden.

Die weiteren Untersuchungen werden deshalb nur noch mit den Ansätzen einer linearen Korrekturfunktion und eines konstanten Zeit-Offsets durchgeführt.

6.1.2 Auswirkungen der unterschiedlichen Modellierungen auf die Objektkoordinaten

Für die Modellierung der Asynchronität mit der linearen Funktion sowie mit dem konstanten Zeit-Offset werden im Weiteren die Auswirkungen der beiden Modellierungen auf die ermittelten Objektkoordinaten näher untersucht. Dafür wurden drei Strecken zwischen Objektkoordinaten von Zielmarken am Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt der Bildsequenz bestimmt und deren Ergebnisse miteinander verglichen. Bei dieser Untersuchung wurden die in Abbildung 6-2 dargestellten Strecken zwischen den Zielmarken auf den A-Säulen des Fahrzeugs analysiert. Bei dem verwendeten Zeitbereich tritt keine Deformation des Fahrzeugs auf, sodass die Referenzlängen der Strecken 1, 2 und 3 konstant sind.

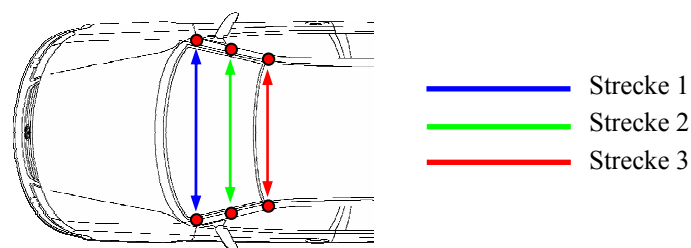


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der Strecken zwischen Zielmarken am Fahrzeug, die zur Überprüfung der korrekten Korrekturfunktion zur Modellierung der Asynchronität genutzt werden

Im Abbildung 6-3 sind die Unterschiede in den Streckenlängen zwischen der Modellierung der Asynchronität mit einer linearen Funktion und mit einem konstanten Zeit-Offset darstellt. Durch diesen Vergleich können die Auswirkungen der unterschiedlichen Modellierungsansätze auf die Streckenlängenberechnung beurteilt werden.

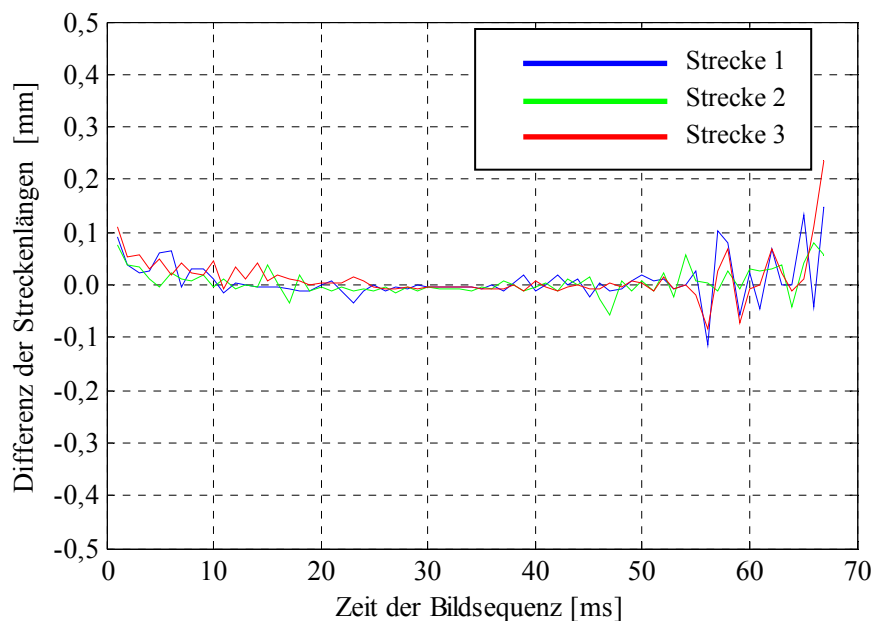


Abbildung 6-3: Differenzen der Streckenlängen zwischen der Auswertung mit linearer Korrekturfunktion und mit konstantem Zeit-Offset zur Modellierung der Asynchronität

Die in Abbildung 6-3 dargestellten Differenzen der Streckenlängen zwischen der Modellierung der Asynchronität mit einer linearen Funktion und mit einem konstanten Zeit-Offset liegen im gesamten Zeitintervall der Auswertung bei allen drei Strecken deutlich unter 0.5 mm. Weiterhin sind keine großen systematischen Abweichungen zu erkennen. Die theoretischen Standardabweichungen der ermittelten Streckenlängen weisen keine Unterschiede zwischen den Auswertungen auf und betragen im Mittel 1.2 mm. Unter Berücksichtigung der theoretischen Standardabweichungen der Streckenlängen und der zulässigen Standardabweichung für die Objektkoordinaten von 5 mm können die Differenzen in den Streckenlängen zwischen den unterschiedlichen Modellierungen der Asynchronität vernachlässigt werden.

6.1.3 Modellierung der Asynchronität aus verschiedenen Ausschnitten der gesamten Bildsequenz

Nachdem für die bisherigen Auswertungen stets die gesamte Bildsequenz genutzt wurde, werden die folgenden Auswertungen mit Ausschnitten der Sequenz, also mit einer reduzierten Anzahl von Bildern durchgeführt. Die Auswertungen mit den Ausschnitten werden an verschiedenen Stellen in den Sequenzen vorgenommen. Damit soll untersucht werden, ob in den verschiedenen Ausschnitten der Bildsequenzen unterschiedliche Asynchronitäten ermittelt werden aus denen sich eine systematische Änderung der Asynchronität im Laufe der Bildsequenz ableiten lässt. Daher wird die Asynchronität bei diesen Auswertungen nur über einem konstanten Zeit-Offset modelliert.

Die Anzahl der aufeinander folgenden Bilder, also des Stichprobenumfangs, wird für diese Auswertung auf fünf Bilder festgelegt. Mit dieser reduzierten Anzahl von Bildern werden insgesamt 60 Auswertungen durchgeführt. Die erste Auswertung beinhaltet die Bilder mit den Nummern eins bis fünf, die zweite Auswertung die Bilder mit den Nummern zwei bis sechs usw.

Die Auswertungen der Ausschnitte aus den Bildsequenzen werden jeweils für alle Kameras gemeinsam ausgewertet. Referenz ist stets die Bildsequenz der Kamera O2, so dass sich alle ermittelten Asynchronitäten auf die Sequenz O2 beziehen. Die Modellierung der Asynchronität wird jeweils mit einem konstanten Zeit-Offset durchgeführt. Die ermittelten Asynchronitäten für die Konstellationen O2-L1, O2-L3, O2-R1 und O2-R3 sind in Abbildung 6-4 dargestellt.

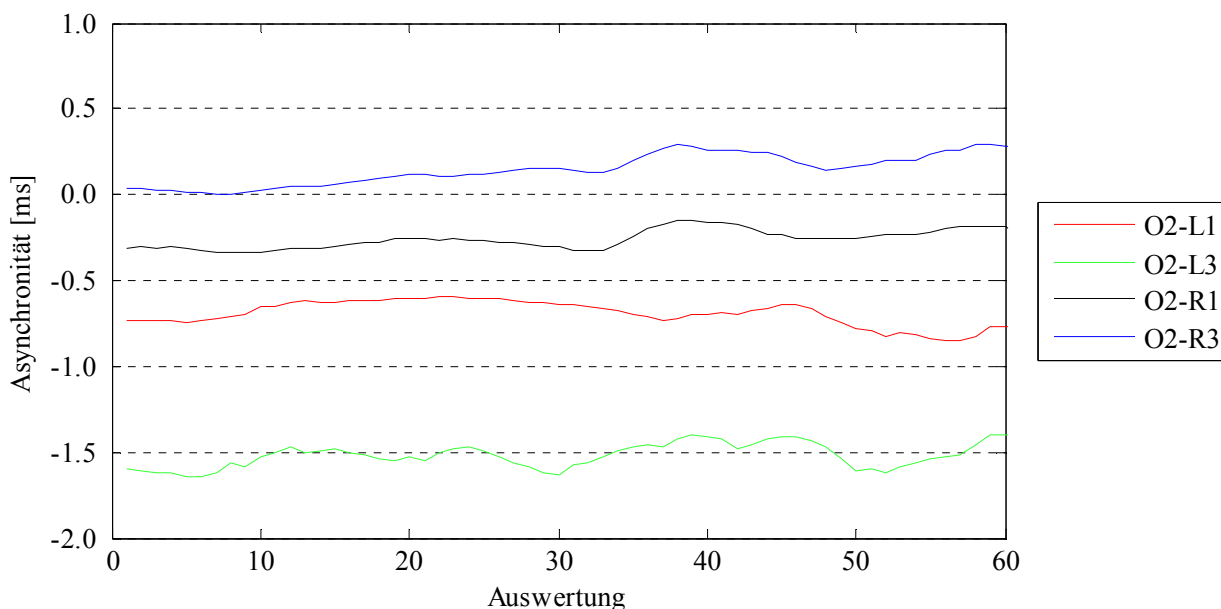


Abbildung 6-4: Variationen der ermittelten Asynchronitäten zwischen den Kamera-paaren, berechnet mit einem konstanten Zeit-Offset aus einer Anzahl von jeweils fünf Bildern an verschiedenen Stellen in der Bildsequenz

Die berechneten Asynchronitäten in Abbildung 6-4 zeigen für alle vier Kamerakonstellationen einen leicht verrauschten Verlauf, der bei keiner der dargestellten Kurven eindeutig auf einen linearen Term zur Modellierung der Asynchronität

schließen lässt. In Abhängigkeit davon, welcher Zeitbereich zur Bestimmung der Asynchronität genutzt wird, zeigen die Kurven der berechneten Asynchronitäten bei allen Auswertungen einen leicht steigenden oder leicht fallenden Verlauf, aus dem keine zuverlässige konstante Steigung oder Neigung abgeleitet werden kann. Eine Auswertung der ersten 20 Auswertungen der Konstellation O2-L1 (siehe rote Kurve in Abbildung 6-4) würde z.B. zu einem positiven linearen Term führen, wohingegen die letzten 20 Auswertungen der gleichen Kurve zu einem negativen linearen Term zur Modellierung der Asynchronität führen.

6.1.4 Analyse der Auswertungen und Festlegung der Modellierungsfunktion

Die statistische Untersuchung der ermittelten Parameter der Korrekturfunktionen zur Modellierung der Asynchronität auf ihre Signifikanz zeigt deutlich, dass die Drift der Aufnahme Frequenz Δt_{Drift} bei der Modellierung über eine Polynomfunktion zweiten Grades als nicht signifikant von Null verschieden bestimmt wurde. Die in der Auswertung mit der linearen Funktion ermittelten Parameter für die Asynchronität sind beide signifikant von Null verschieden. Aus statistischer Sicht sollte somit für diesen Versuch ein linearer Ansatz zur Modellierung der Asynchronität gewählt werden.

Im zweiten Teil der Auswertung wurden die Auswirkungen der Modellierung mit einer linearen Korrekturfunktion und mit einem konstanten Zeit-Offset auf die ermittelten Objektkoordinaten bzw. auf die daraus berechneten Strecken untersucht. Die Auswertung wurde mit den beiden Korrekturfunktionen durchgeführt und die Differenzen zwischen den Ergebnissen analysiert. Die ermittelten Unterschiede in den Streckenlängen liegen alle deutlich unter 0.5 mm. Diese Abweichung ist bei der Anforderung von maximal 5 mm für die Standardabweichung der Objektkoordinaten als nicht relevant einzustufen. Somit ist aufgrund der Genauigkeitsforderung eine konstante Modellierung der Asynchronität ausreichend.

Im dritten Teil der Auswertung wurde die Asynchronität aus fünf aufeinander folgenden Bildern bestimmt. Die Auswertung mit dieser reduzierten Stichprobe wurde an verschiedenen Stellen innerhalb der Bildsequenz durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen ein deutliches Rauschen der ermittelten Asynchronität von bis zu 0.2 ms. Eine eindeutige Steigung bzw. Neigung der Kurve, die auf einen linearen Ansatz und somit auf unterschiedliche Aufnahme Frequenzen schließen lässt, kann nicht bestimmt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass eine Modellierung der Asynchronität mit einem konstanten Zeit-Offset hinreichend korrekte Ergebnisse liefert und für die Modellierung der Asynchronität bei dieser Bildsequenzauswertung ausreichend ist.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Festlegung der Korrekturfunktion zur Modellierung der Asynchronität berücksichtigt werden muss, ist dass bei diesem Versuch alle Bildsequenzen mit dem gleichen Kamertyp, der HG Imager 2000 von Redlake, aufgenommen wurden. Laut dem Datenblatt des Herstellers haben die Quarze der Kameras eine Toleranz von ca. 5 ppm. Bei einer Aufnahme Frequenz von 1 000 Hz ergibt sich daraus eine Variation von 0.005 Hz. Somit würde sich zwischen zwei Kameras dieses Typs eine Differenz in der Aufnahme Frequenz von maximal 0.01 Hz erklären lassen. Die Umrechnung der berechneten Werte für das Verhältnis der jeweiligen Aufnahme Frequenz zur Referenzfrequenz Δt_{Ratio} der Modellierung mit einer linearen Funktion (siehe Tabelle 6-1) führen, unter der Annahme einer Referenzfrequenz von 1 000 Hz, zu einem Unterschied in der Aufnahme Frequenz von 2 bis 5 Hz zwischen zwei Kameras eines Typs, der so in der Realität nicht auftreten kann.

Aufgrund der Ergebnisse der zweiten und dritten Untersuchung sowie der Herstellerangaben erfolgt die Modellierung der Asynchronität in den folgenden Untersuchungen mit dem konstanten Zeit-Offset Δt_{Offset} . Der lineare Term wurde zwar statistisch signifikant bestimmt, jedoch ist seine Auswirkung auf die Berechnung der Objektkoordinaten deutlich geringer als die zulässige Standardabweichung der ermittelten Objektkoordinaten von maximal 5 mm, sodass eine Modellierung über einen konstanten Zeit-Offset unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Standardabweichung ausreichend ist.

Bei diesem Versuch wurde zur Synchronisation der Kameras das Frame-Sync Verfahren eingesetzt (siehe Abbildung 4-9). Aufgrund des Funktionsprinzips dieser Art der Synchronisation kann bei Aufnahmen mit einer Frequenz von 1 000 Hz eine Asynchronität von maximal 1 ms auftreten. Bei der Auswertung dieses Versuchs wird zwischen den

Kameras O2 und L3 jedoch eine Asynchronität von 1.5 ms ermittelt. Dies lässt vermuten, dass bei der Synchronisation der Kameras andere nicht reproduzierbare Effekte zu einer zusätzlichen Asynchronität zwischen den Kameras geführt haben, die jedoch durch das neue Verfahren berücksichtigt und somit eliminiert wird.

6.2 Plausibilitätskontrolle der ermittelten Asynchronitäten im Kameraverband

Zur Überprüfung der ermittelten Asynchronitäten werden die Kamerakonstellationen in diesem Abschnitt in allen möglichen Kombinationen ausgewertet und die Asynchronitäten der jeweiligen Kamerapaare miteinander verglichen und auf Plausibilität getestet.

Neben der Variation der Kamerakonstellation wird auch der für die Auswertung genutzte Zeitbereich reduziert und innerhalb des gesamten Auswertzeitbereichs variiert. Die Auswirkungen auf die ermittelten Parameter der Asynchronität werden analysiert und daraus wird eine Minimalanforderung für die Anzahl benötigter Bilder für diesen Versuch bestimmt.

6.2.1 Berechnung der Asynchronitäten zwischen den Kameras aus unterschiedlichen Konstellationen

In dieser Auswertung werden die Asynchronitäten zwischen den fünf Kameras des Aufnahmeverbands aus verschiedenen Kamerakonstellationen, bestehend aus jeweils zwei oder drei Kameras, berechnet. Zur Auswertung werden für jede Kamerakonstellation alle Bilder der Sequenz genutzt.

Zunächst werden die Auswertungen für die Konstellationen mit den Kameras L1 und L3 und der Kamera O2 durchgeführt. Die Analyse umfasst jeweils die sechs möglichen Konstellationen von zwei und drei Kameras. Dabei wird jede Kamera mindestens einmal als Referenz für die Bestimmung der Asynchronität genutzt. Im Anschluss werden entsprechend die Bildsequenzen der Kameras R1 und R3 und der Kamera O2 untersucht. Die Auswertungen werden ebenfalls in allen möglichen Konstellationen, bestehend aus zwei und drei Kameras, durchgeführt. Die Ergebnisse der Auswertungen sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst. Neben dem Parameter für die Asynchronität, dem Zeit-Offset Δt_{Offset} und dessen Standardabweichung $s_{\Delta t_{Offset}}$ wird auch die Standardabweichung der Gewichtseinheit a posteriori s_0 angegeben. Für einen ersten Plausibilitätstest werden die Kombinationen der Zwei-Kamera-Konstellationen, wie z.B. L1-O2 und O2-L1, miteinander verglichen. Da der Betrag der Asynchronität zwischen den beiden Kameras identisch sein sollte, muss die Addition der ermittelten Asynchronitäten Null ergeben. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in der letzten Spalte der Tabelle 6-2 aufgeführt. Für die Drei-Kamera-Konstellationen entfällt dieser erste Plausibilitätstest.

Aufnahme-Konstellation		Δt_{Offset} [ms]	$s_{\Delta t_{Offset}}$ [ms]	s_0 [μm] [pix]		Differenz [ms]
L1	L3	./.	./.	./.		./.
L3	L1	./.	./.	./.		
L1	O2	0.685	0.014	3.8	0.2	0.011
O2	L1	-0.696	0.011	3.3	0.2	
L3	O2	1.505	0.012	3.3	0.2	0.014
O2	L3	-1.519	0.012	3.2	0.2	
L1	L3	-0.810	0.011	3.1	0.2	./.
	O2	0.696	0.010			
L3	L1	0.806	0.011	3.1	0.2	
	O2	1.501	0.011			
O2	L1	-0.697	0.010	3.0	0.2	
	L3	-1.510	0.011			
R1	R3	./.	./.	./.		./.
R3	R1	./.	./.	./.		
R1	O2	0.271	0.013	3.8	0.2	0.014
O2	R1	-0.257	0.011	3.2	0.2	
R3	O2	-0.167	0.014	3.9	0.2	0.015
O2	R3	0.152	0.016	4.8	0.3	
R1	R3	0.411	0.011	3.3	0.2	./.
	O2	0.257	0.011			
R3	R1	-0.412	0.011	3.3	0.2	
	O2	-0.155	0.011			
O2	R1	-0.258	0.011	3.3	0.2	
	R3	0.154	0.011			

Tabelle 6-2: Ergebnisse der Modellierung der Asynchronität in allen möglichen Zwei- und Drei-Kamera-Konstellationen der Bildsequenzen von L1, L3 und O2 sowie R1, R3 und O2

Die in Tabelle 6-2 bestimmten Differenzen bei den Zwei-Kamerakonstellationen sind unter Berücksichtigung der jeweiligen Standardabweichung nicht signifikant von Null verschieden. Eine Ausnahme bilden die vier Zwei-Kamerakonstellationen L1-L3, L3-L1, R1-R3 sowie R3-R1, bei denen die Ausgleichung keine Ergebnisse lieferte, da sich bei diesen Konstellationen alle gemessenen Objektpunkte in den jeweiligen Epipolarebenen bewegen.

Aus den in Tabelle 6-2 dargestellten Konstellationen werden im Folgenden jeweils die Asynchronitäten zwischen den Kamera paaren einander gegenübergestellt und auf Plausibilität getestet. Die vier Konstellationen, bei denen die Ausgleichung keine Ergebnisse lieferte, werden bei der Plausibilitätskontrolle nicht weiter berücksichtigt. Die Zusammenstellung aus den anderen Kamera konstellationen ist für die Asynchronitäten zwischen den Kamera paaren L1-L3, L1-O2 und L3-O2 in Tabelle 6-3 und entsprechend für die Asynchronitäten zwischen den Kamera paaren R1-R3, R1-O2 und R3-O2 in Tabelle 6-4 dargestellt.

Die Asynchronitäten können jeweils bis auf evtl. einen Vorzeichenwechsel direkt aus Tabelle 6-2 übernommen werden. Zur Bestimmung der Asynchronität z.B. zwischen L1 und L3 aus der Drei-Kamerakonstellation O2-L1-L3 wird die Differenz zwischen der ermittelten Asynchronitäten von O2-L3 und O2-L1 dieser Konstellation herangezogen.

Aufnahme-Konstellation	Δt_{Offset} zwischen L1 und L3 [ms]	Δt_{Offset} zwischen L1 und O2 [ms]	Δt_{Offset} zwischen L3 und O2 [ms]
L1 - O2	-	0.685	-
O2 - L1	-	0.696	-
L3 - O2	-	-	1.505
O2 - L3	-	-	1.519
L1 - L3 - O2	-0.810	0.696	1.507
L3 - L1 - O2	-0.806	0.695	1.501
O2 - L1 - L3	-0.813	0.697	1.510
Mittelwert	-0.810	0.696	1.506

Tabelle 6-3: Asynchronitäten zwischen den Kameras L1, L3 und O2 berechnet aus allen Zwei- und Drei-Kamerakonstellationen, Mittelwert der Asynchronität berechnet aus den drei Drei-Kamerakonstellationen

Die in Tabelle 6-3 aufgeführten Ergebnisse der Auswertungen für die Zwei-Kamerakonstellationen zeigen Variationen in der ermittelten Asynchronität von bis zu 0.014 ms. Die Ergebnisse der Drei-Kamerakonstellationen in Tabelle 6-3 weisen geringe Variationen in den ermittelten Asynchronitäten auf. Die maximale Variation tritt bei den drei Auswertungen der Konstellation L3-O2 auf und beträgt 0.009 ms. Unter Berücksichtigung der berechneten Standardabweichung der Asynchronität für die Drei-Kamerakonstellationen von im Mittel 0.011 ms (siehe Tabelle 6-2) kann diese Abweichung vernachlässigt werden.

Zur weiteren Überprüfung der Ergebnisse auf Plausibilität wird für die ermittelten Asynchronitäten der drei Kamera-paare L1-L3, L1-O2 und L3-O2 der Schleifenschlussfehler für diese Kamerakonstellation wie folgt berechnet:

$$\Delta t_{Error}(L1-L3-O2) = \Delta t_{Offset}(L1-L3) + \Delta t_{Offset}(L3-O2) - \Delta t_{Offset}(L1-O2) \quad (6.1)$$

mit

- $\Delta t_{Error}(L1-L3-O2)$: Schleifenschlussfehler der Kamerakonstellation L1-L3-O2 [s]
- $\Delta t_{Offset}(L1-L3)$: Mittelwert der Asynchronität zwischen den Kameras L1 und L3 [s]
- $\Delta t_{Offset}(L3-O2)$: Mittelwert der Asynchronität zwischen den Kameras L3 und O2 [s]
- $\Delta t_{Offset}(L1-O2)$: Mittelwert der Asynchronität zwischen den Kameras L1 und O2 [s]

Der berechnete Schleifenschlussfehler der Mittelwerte der Asynchronität für die Kamerakonstellation L1-L3-O3 liegt für diesen Versuch bei 0.000 ms.

Aufnahme-Konstellation	Δt_{Offset} zwischen R1 und R3 [ms]	Δt_{Offset} zwischen R1 und O2 [ms]	Δt_{Offset} zwischen R3 und O2 [ms]
R1 - O2	-	0.271	-
O2 - R1	-	0.257	-
R3 - O2	-	-	-0.167
O2 - R3	-	-	-0.152
R1 - R3 - O2	0.411	0.257	-0.154
R3 - R1 - O2	0.412	0.258	-0.155
O2 - R1 - R3	0.412	0.258	-0.154
Mittelwert	0.412	0.258	-0.154

Tabelle 6-4: Asynchronitäten zwischen den Kameras R1, R3 und O2 berechnet aus allen Zwei- und Drei-Kamerakonstellationen, Mittelwert der Asynchronität berechnet aus den drei Drei-Kamerakonstellationen

Die in Tabelle 6-4 aufgeführten Auswertungen der Zwei-Kamerakonstellationen der rechten Seite zeigen analog zur Auswertung der Kameras der linken Seite, Variationen in der ermittelten Asynchronität von 0.015 ms. Die Ergebnisse der Drei-Kamerakonstellationen in Tabelle 6-4 weisen jeweils eine Variation von 0.001 ms in den ermittelten Asynchronitäten auf. Der Schleifenschlussfehler der Asynchronität beträgt bei der Kamerakonstellation R1-R3-O2 analog zum Schleifenschlussfehler der Asynchronität auf der linken Seite 0.000 ms.

6.2.2 Auswirkung der Reduzierung der Anzahl der Bilder auf die Ergebnisse der Auswertung

Im Weiteren wird die Anzahl der zur Auswertung genutzten Bilder systematisch verringert und die Auswirkung auf die ermittelte Asynchronität analysiert. Dazu wurde statt der 70 aufeinander folgenden Bilder eine geringere Anzahl von Bildern zur Bestimmung der Asynchronität berücksichtigt. Die Anzahl wurde systematisch bis auf nur zwei aufeinander folgende Bilder reduziert und damit an verschiedenen Positionen innerhalb der Sequenz Auswertungen durchgeführt. In Tabelle 6-5 sind jeweils die maximal und minimal ermittelte Asynchronität zwischen den fünf Kameras und die entsprechende Bildanzahl zusammengefasst. Des Weiteren wurde für jede Auswertung die mittlere Streckenlänge zwischen den Objektpunkten SLV1 und SRV1 auf den Türschwellern des Fahrzeugs (siehe Abbildung 6-5) bestimmt. In Tabelle 6-5 ist die minimale und die maximale Länge dieser Strecke zwischen den beiden Objektpunkten SLV1 und SRV1 für die jeweilige Anzahl von Bildern zusätzlich aufgeführt.

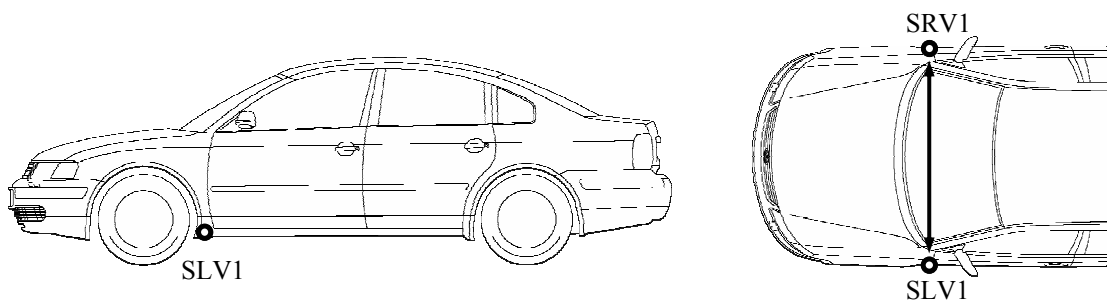


Abbildung 6-5: Schematische Darstellung der Strecke zwischen den beiden Objektpunkten SLV1 und SRV1 auf den Türschwellern des Fahrzeugs, links: Ansicht der linken Fahrzeugseite, rechts: Ansicht der Fahrzeugoberseite

Anzahl Bilder	Anzahl Auswertungen	Berechnete Asynchronität [ms]								Berechnete Strecke [mm]	
		O2-L1		O2-L3		O2-R1		O2-R3		SLV1-SRV1	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
70	1	-0.697		-1.510		-0.258		0.154		1685.4	
50	20	-0.700	-0.664	-1.518	-1.492	-0.275	-0.235	0.115	0.202	1684.9	1685.4
40	30	-0.729	-0.645	-1.541	-1.485	-0.289	-0.226	0.092	0.231	1684.3	1686.3
30	40	-0.757	-0.637	-1.545	-1.464	-0.299	-0.201	0.065	0.253	1683.1	1685.8
20	50	-0.804	-0.613	-1.560	-1.455	-0.313	-0.207	0.038	0.263	1681.7	1687.1
10	60	-0.832	-0.602	-1.621	-1.414	-0.325	-0.172	0.017	0.339	1680.7	1689.5
5	65	-0.852	-0.594	-1.645	-1.366	-0.337	-0.146	0.005	0.400	1678.3	1691.2
2	68	-0.892	-0.578	-1.731	-1.339	-0.361	-0.120	0.004	0.501	1672.6	1692.4

Tabelle 6-5: Auswirkungen der Reduzierung der Anzahl aufeinander folgender Bilder auf die berechnete Asynchronität und die ermittelte Länge der Strecke zwischen den Objektpunkten SLV1 und SRV1

Anhand der ermittelten minimalen und maximalen Asynchronität in Tabelle 6-5 ist deutlich zu erkennen, dass der berechnete Wert für die Asynchronität mit sinkender Anzahl von aufeinander folgenden Bildern stärker variiert. Zur Bewertung der Variation der Asynchronität werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Asynchronitäten auf die Strecke zwischen den beiden Punkten auf den Türschwellern SLV1 und SRV1 am Fahrzeug (siehe Abbildung 6-2) herangezogen. Diese Strecke hat eine Länge von 1685.4 mm. Die Objektpunkte dieser Strecke können jeweils nur in den beiden Sequenzen von links bzw. von rechts gemessen werden. In der Sequenz der Kamera O2 sind die beiden Punkte nicht sichtbar. Dadurch sind die Auswirkungen einer Variation der Asynchronitäten der Kameras auf diese Strecke am größten.

Die Anforderung an die Standardabweichung der Streckenlängenberechnung liegt bei diesem Versuch bei 5 mm. Die Betrachtung der ermittelten Minimal- und Maximalwerte für die Strecke zeigt, dass die Forderung nach einer maximalen Abweichung von 5 mm bei einer Anzahl von 10 aufeinander folgenden Bildern noch eingehalten wird. Die Abweichung in der ermittelten Asynchronität liegt bei dieser Bildanzahl bei ca. 0.15 ms. Eine weitere Reduzierung der Bildanzahl führt bei diesem Versuch zu Abweichungen in der Strecke, die oberhalb der zulässigen Standardabweichung von maximal 5 mm liegen.

6.2.3 Analyse der Ergebnisse und abschließende Bewertung der Plausibilität

Die aus den Zwei- und Drei-Kamerakonstellationen berechneten Asynchronitäten für die jeweiligen Kamerapaare sind in sich plausibel. Die Unterschiede in den ermittelten Werten für die Asynchronität liegen bei maximal 0.02 ms und sind unter Berücksichtigung der ermittelten Standardabweichungen nicht signifikant von Null verschieden. Eine Ausnahme stellen die Zwei-Kamerakonstellationen L1-L3 und R1-R3 dar. In diesem Fall liefert die Auswertung mit dem Verfahren zur Berücksichtigung der Asynchronität keine Ergebnisse. Bei den Konstellationen L1-L3 und R1-R3 bewegen sich alle Objektpunkte annähernd innerhalb ihrer Epipolarebenen und erfüllen damit die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des neuen Verfahrens (siehe Abschnitt 3.3) nicht.

Die Tatsache, dass die ermittelten Asynchronitäten in sich plausibel sind, belegt die Vermutung aus Abschnitt 6.1.4, dass bei der Synchronisation der Kameras weitere nicht reproduzierbare Effekte zu einer zusätzlichen Asynchronität zwischen den Kameras geführt haben, die oberhalb der eigentlichen Genauigkeit des Synchronisationsverfahrens liegt.

Die Reduzierung der Anzahl der aufeinander folgenden Bilder zeigt, dass das Verfahren auch mit einer reduzierten Anzahl von Bildern plausible und zuverlässige Ergebnisse liefert. Die Auswirkungen auf die ermittelten Objektkoordinaten wurden anhand der Variation einer Streckenlänge belegt. Bei diesem Versuch traten signifikante Änderungen in der Streckenlänge größer als 5 mm erst bei einer Reduzierung auf weniger als 10 aufeinander folgende Bilder auf. Speziell bei der Auswertung von Sicherheitsversuchen können Zielmarken am Fahrzeug für einen

bestimmten Zeitbereich verdeckt werden und somit nicht zu jedem Zeitpunkt der Bildsequenz berechnet werden. Anhand dieser Untersuchung wird belegt, dass bei diesem Versuch eine Anzahl von 10 aufeinander folgenden Bildern bei dieser Aufnahmekonstellation ausreicht um die Asynchronität präzise zu bestimmen und somit eine Standardabweichung von maximal 5 mm für die Objektpunktkoordinaten zu gewährleisten.

6.3 Berechnung der Position und Bewegung des Dummykopfs in Relation zur A-Säule

Eine Anforderung der Fahrzeugentwicklung an die Bildsequenzauswertung von Sicherheitsversuchen ist neben der Bestimmung von Abständen zwischen einzelnen Bauteilen des Fahrzeugs auch die Ermittlung von Abständen zwischen den Dummies und Teilen des Fahrzeugs während des Sicherheitsversuchs. Dies ist z.B. der Abstand zwischen dem Dummykopf und dem Lenkradkranz des Fahrzeugs oder der Abstand zwischen dem Dummykopf und Teilen der Innenverkleidung von A-Säule, B-Säule oder der Tür des Fahrzeugs.

In der folgenden Untersuchung werden die Auswirkungen der Vernachlässigung der Asynchronität auf die Abstandsbestimmung anhand eines Beispiels erläutert. Dazu wird der Abstand zwischen der Zielmarke auf der rechten Seite des rechten Dummykopfs (DKR2) und der Zielmarke im oberen Bereich der rechten A-Säule des Fahrzeugs (ASR2) analysiert (siehe rote Markierungen in Abbildung 6-6). Zum Vergleich wird die Abstandsmessung auf der linken Seite des Fahrzeugs, also zwischen der Zielmarke auf der linken Seite des linken Dummykopfs (DKL2) und der Zielmarke im oberen Bereich der linken A-Säule des Fahrzeugs (ASL2), analog durchgeführt. Bei diesem Sicherheitsversuch dreht sich das Fahrzeug nach dem Aufprall seitlich weg. Daher ist der Abstand der beiden Dummyköpfe zueinander, sowie die Abstände zu den jeweiligen B-Säulen des Fahrzeugs für die weitere Fahrzeugentwicklung ebenfalls von Interesse und werden in die Untersuchungen einbezogen.

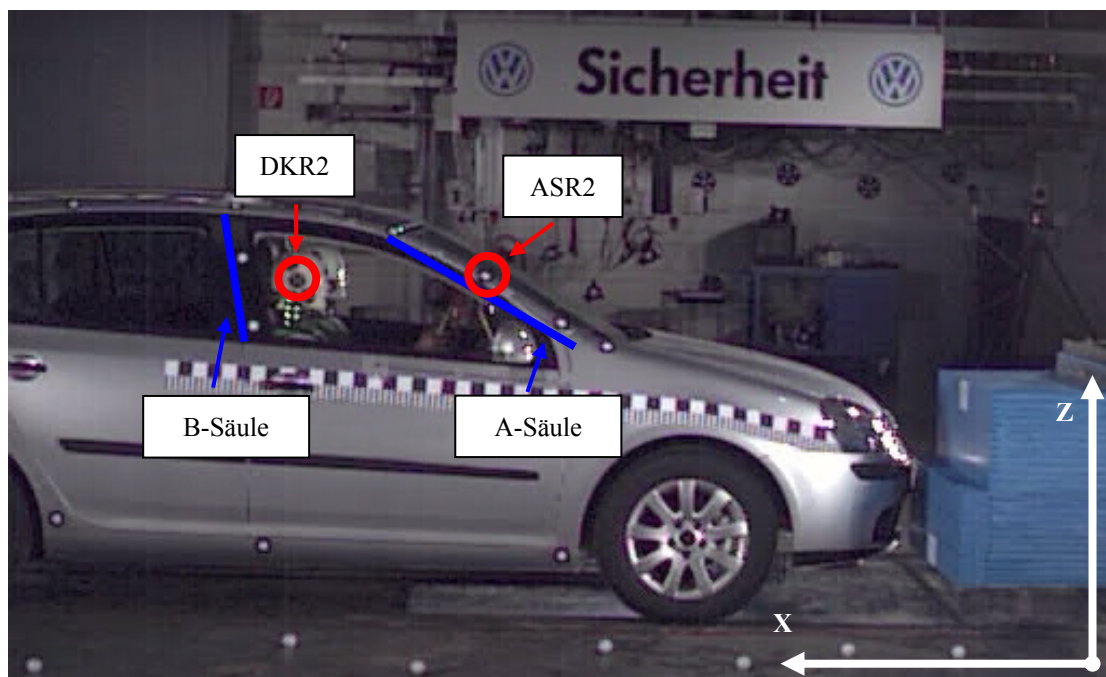


Abbildung 6-6: Bild aus der Sequenz der Kamera R1 mit den beiden Zielmarken auf der rechten A-Säule des Fahrzeugs (ASR2) und auf dem rechten Dummykopf (DKR2) zwischen denen der Abstand bestimmt werden soll sowie der Markierung der oberen Bereiche der A- und B-Säule der rechten Fahrzeugseite (blaue Linien)

Zur präzisen Bestimmung des minimalen Abstands zwischen Dummykopf und Innenverkleidung der A-Säule müsste die exakte Form und Orientierung des Kopfs sowie die Form der Innenverkleidung der A-Säule des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Zur Vereinfachung wird für die folgende Untersuchung die Auswertung auf den Abstand zwischen der Zielmarke auf der A-Säule und der auf dem Dummykopf beschränkt. Zur Verdeutlichung der

Auswirkungen der Vernachlässigung einer Asynchronität auf die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung ist die Abstandsmessung zwischen den beiden Zielmarken ausreichend.

Bei diesem Versuch liegen keine Referenzwerte für die Analyse der Strecken zwischen den Zielmarken auf dem Fahrzeug und auf dem Dummykopf vor. Die Verifizierung der ermittelten Abstände erfolgt durch den Vergleich der Ergebnisse verschiedener Auswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität.

6.3.1 Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität

Die Bildsequenzen aller fünf Kameras werden mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität simultan ausgewertet. Die Referenz für die berechneten Asynchronitäten bildet die Zeitbasis der Sequenz O2. Die Ergebnisse der Auswertung sind für die Objektpunkte ASL2 und DKL2 zur Abstandsmessung auf der linken Fahrzeugseite sowie für ASR2 und DKR2 zur Abstandsmessung auf der rechten Fahrzeugseite zum Zeitpunkt T_0 in Tabelle 6-6 zusammengefasst.

Aufnahmekonstellation O2-L1-L3-R1-R3		Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität		Auswertung mit Berücksichtigung der Asynchronität		Differenz zwischen den Auswertungen
		Koord. [mm]	Stdabw. [mm]	Koord. [mm]	Stdabw. [mm]	Diff. der Koord. [mm]
ASL2	X	2100.8	3.6	2091.5	0.8	9.3
	Y	-5204.6	5.4	-5200.0	1.4	-4.6
	Z	-332.0	4.1	-330.4	0.7	-1.6
DKL2	X	2770.3	7.9	2763.0	1.5	7.3
	Y	-4968.2	19.5	-4942.0	3.3	-26.2
	Z	-316.7	4.4	-317.6	0.7	0.9
ASR2	X	2087.5	3.4	2087.0	1.0	0.5
	Y	-3844.5	5.7	-3845.3	1.7	0.8
	Z	-350.1	4.1	-350.0	1.1	-0.1
DKR2	X	2785.7	4.4	2784.2	1.2	1.5
	Y	-4117.3	35.4	-4145.9	11.3	28.6
	Z	-324.2	4.4	-325.2	1.2	1.0
s_0		12.2 μm (0.8 Pixel)		3.6 μm (0.2 Pixel)		

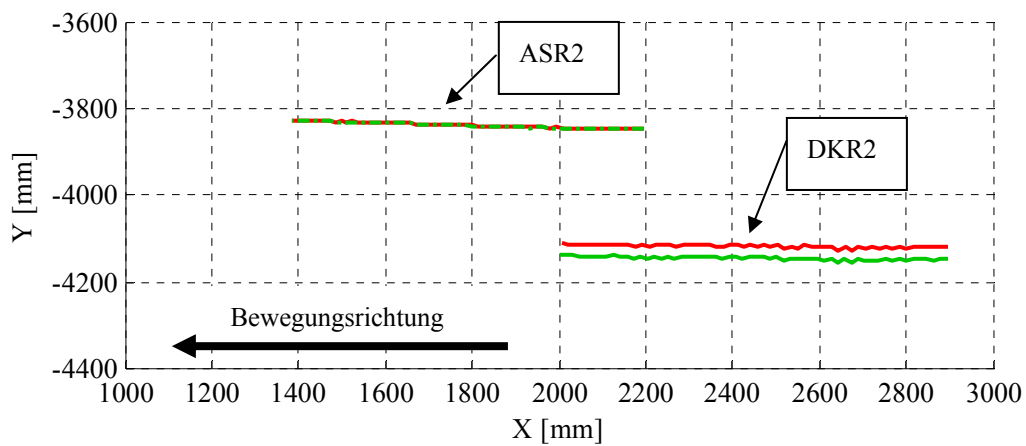
Tabelle 6-6: Vergleich der berechneten Koordinaten der Zielmarken ASL2 und DKL2 zur Abstandsmessung auf der linken Fahrzeugseite sowie für ASR2 und DKR2 zur Abstandsmessung auf der rechten Fahrzeugseite zum Zeitpunkt T_0 aus den Auswertungen der Sequenzen der Kamerakonstellation O2-L1-L3-R1-R3 mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität

Die in Tabelle 6-6 dargestellten Differenzen zwischen den ermittelten Objektkoordinaten aus den Auswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität zeigen teilweise signifikante von Null verschiedene Werte. Die Marken auf den A-Säulen des Fahrzeugs können jeweils in drei Sequenzen O2, L1 und L3, bzw. O2, R1 und R3, gemessen werden. Die Zielmarken auf den jeweiligen Seiten der Dummyköpfe können jeweils nur in zwei Sequenzen, L1 und L3 bzw. R1 und R3, gemessen werden. Aufgrund dieser Aufnahmekonstellation lässt sich die größere Standardabweichung in den Y-Koordinaten im Vergleich zu den Standardabweichungen der X- und Z-Koordinaten der Objektpunkte erklären. Die unterschiedlich große Standardabweichung der Y-Koordinaten der Objektpunkte auf dem Dummykopf DKL2 und DKR2 kommt aufgrund des unterschiedlichen Abstands zwischen den Kameras L1 und L3 bzw. R1 und R3 zustande. Der Abstand zwischen den Kameras R1 und R3 ist deutlich geringer als der Abstand zwischen den Kameras L1 und L3 (siehe Abbildung 4-7).

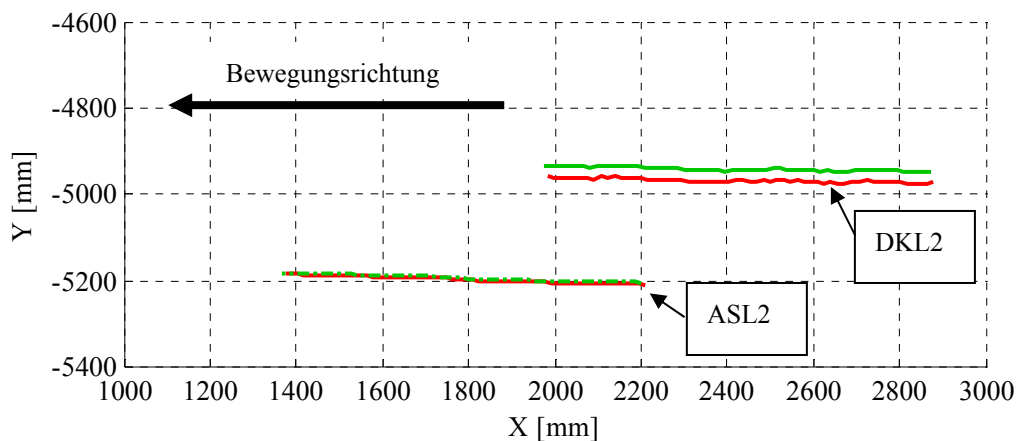
Die Abweichungen der berechneten X-Koordinaten der vier Zielmarken (siehe Tabelle 6-6) sind zum Zeitpunkt T_0 zwischen der linken und der rechten Fahrzeugseite deutlich unterschiedlich. Bei den Zielmarken auf der linken

Fahrzeugseite (ASL2 und DKL2) treten Unterschiede von 9.3 mm bzw. 7.3 mm in der X -Komponente auf. Die Unterschiede in den Koordinaten der Zielmarken der rechten Fahrzeugseite (ASR2 und DKR2) sind nicht signifikant von Null verschieden. Die größten Unterschiede weisen die Y -Koordinaten der jeweiligen Zielmarken auf. Sie liegen für die Marken auf der linken Seite bei 4.6 mm bzw. 26.2 mm und für die Marken auf der rechten Seite bei 0.8 mm bzw. 28.6 mm. Die Unterschiede in den Z -Koordinaten liegen bei maximal 1.6 mm und können bei allen vier Zielmarken vernachlässigt werden.

Die Trajektorien der vier Zielmarken im Objektraum sind für die Auswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität in der XY -Ebene in Abbildung 6-7 dargestellt. Die roten Kurven in Abbildung 6-7 stellen die Ergebnisse der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität dar. Die grünen Kurven in der Abbildung zeigen entsprechend die Ergebnisse der Auswertung mit dem neuen Verfahren.



a) Ergebnisse der Auswertungen der rechten Fahrzeugseite (ASR2 und DKR2)



b) Ergebnisse der Auswertungen der linken Fahrzeugseite (ASL2 und DKL2)

- Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Asynchronität
- Ergebnisse mit Berücksichtigung der Asynchronität

Abbildung 6-7: Trajektorien der Zielmarken ASR2 und DKR2 (a) und ASL2 und DKL2 (b), berechnet ohne (rote Kurven) und mit (grüne Kurven) Berücksichtigung der Asynchronität, Darstellung der Trajektorien als Aufsicht in der XY -Ebene

Im Vergleich der mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität berechneten Trajektorien (siehe Abbildung 6-7) ist deutlich zu erkennen, dass die in Tabelle 6-6 ermittelten Unterschiede für den Zeitpunkt T_0 über den gesamten analysierten Zeitbereich etwa konstant sind. Die Trajektorien der Zielmarken auf den A-Säulen des Fahrzeugs (ASL2 und ASR2) zeigen nur geringe Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Auswerteverfahren. Bei den Zielmarken auf den Dummyköpfen (DKL2 und DKR2) ist jedoch ein deutlicher systematischer Versatz in Y -Richtung zu erkennen.

6.3.2 Ermittlung des Abstands zwischen Dummykopf und A-Säule

Aus den ermittelten Objektkoordinaten werden jeweils die Abstände zwischen den Zielmarken auf dem Dummykopf und auf der A-Säule des Fahrzeugs ermittelt. Die berechneten Abstände sind mit den zugehörigen Standardabweichungen für den Zeitpunkt T_0 in Tabelle 6-7 dargestellt.

Analysierte Strecke	Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität		Auswertung mit Berücksichtigung der Asynchronität		Differenz
	Länge [mm]	Stdabw. [mm]	Länge [mm]	Stdabw. [mm]	Diff. Länge [mm]
Strecke zwischen ASL2 und DKL2	710.1	10.6	719.5	2.0	-9.4
Strecke zwischen ASR2 und DKR2	750.1	14.0	759.6	4.8	-9.5

Tabelle 6-7: Vergleich der berechneten Strecken zwischen den Zielmarken auf dem Dummykopf und der A-Säule der linken Fahrzeugseite (ASL2 und DKL2) und auf der rechten Fahrzeugseite (ASR2 und DKR2) ohne und mit Berücksichtigung der Asynchronität zum Zeitpunkt T_0

Die Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität ergibt für den Abstand zwischen den beiden Zielmarken der linken Fahrzeugseite ASL2 und DKL2 zum Zeitpunkt T_0 einen Wert von 710.1 mm mit einer Standardabweichung von 10.6 mm. Mit dem Verfahren zur Berücksichtigung der Asynchronität wird ein Abstand von 719.5 mm mit einer Standardabweichung von 2.0 mm berechnet (siehe Tabelle 6-7). Der Abstand der beiden Zielmarken wurde durch die Vernachlässigung der Asynchronität um 9.4 mm zu kurz bestimmt. Die Analyse der Auswertungen der rechten Fahrzeugseite ergab ebenfalls, dass durch die Vernachlässigung der Asynchronität ein um 9.5 mm zu kurzer Abstand bestimmt wurde.

Anhand des berechneten Abstands zwischen den beiden Zielmarken ASR2 und DKR2 auf der rechten Fahrzeugseite wird im Folgenden die Änderung des Abstands innerhalb des gesamten analysierten Zeitbereichs betrachtet. Der berechnete Abstand zwischen den beiden Zielmarken für den ausgewerteten Zeitbereich ist in Abbildung 6-8 dargestellt.

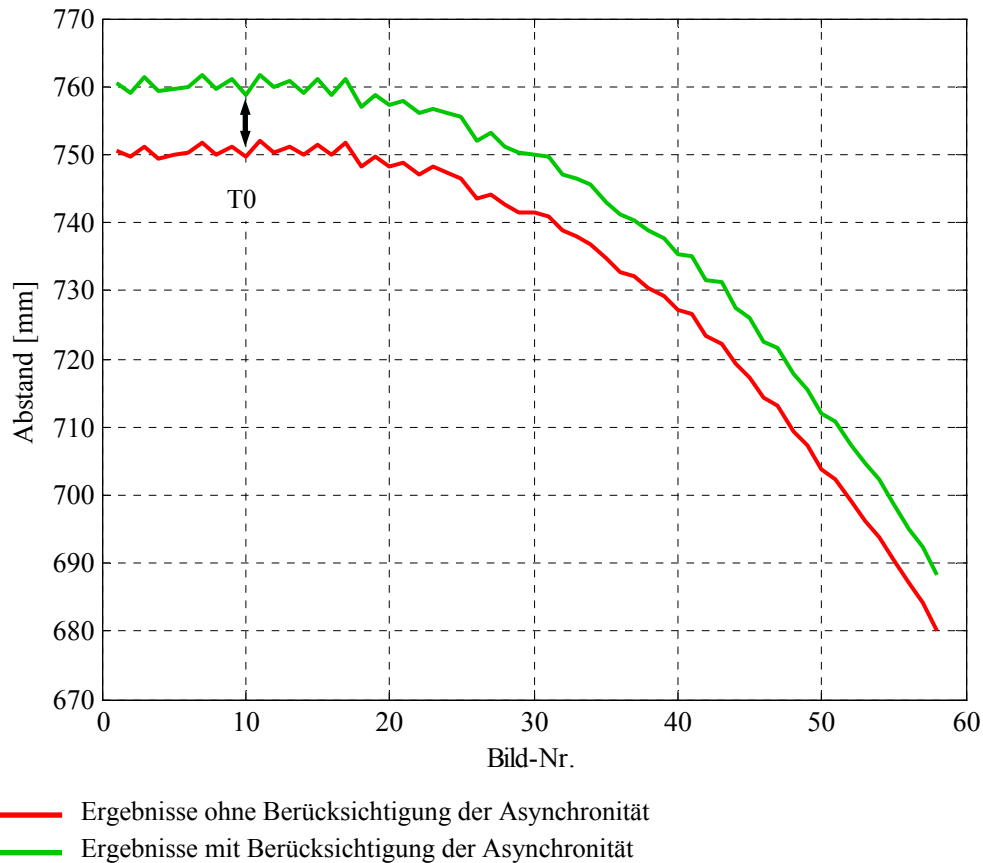


Abbildung 6-8: Vergleich des Abstands zwischen den Zielmarken ASR2 und DKR2 über den gesamten Zeitbereich ohne und mit Berücksichtigung der Asynchronität

Der bisher betrachtete Zeitpunkt T_0 entspricht dem Bild Nr. 10 in Abbildung 6-8. Ab dem Bild Nr. 18 verringert sich der Abstand zwischen den Zielmarken auf dem Dummykopf und auf der A-Säule, da sich durch den Aufprall des Fahrzeugs auf die Defo-Barriere zum Zeitpunkt T_0 der Dummykopf nach vorne in Richtung der A-Säule bewegt. In Abbildung 6-8 ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen der Auswertung ohne und mit Berücksichtigung der Asynchronität in der Anfangsphase bis Bild Nr. 18 konstant bei ca. 9,5 mm liegt. Die Variationen in diesem Zeitbereich können vernachlässigt werden. Ab Bild Nr. 18 ändert sich Geschwindigkeit der Zielmarke auf der A-Säule des Fahrzeugs durch den Aufprall auf die Defo-Barriere. Durch die Verringerung der Geschwindigkeit wirkt sich die Asynchronität geringer aus. In diesem Fall reduziert sich die Differenz der mit den beiden Auswerteverfahren ermittelten Abstände bis zum Ende des analysierten Zeitbereichs auf ca. 8 mm. Die gleichen Effekte wurden auch bei der Auswertung des Abstands zwischen den Zielmarken ASL2 und DKL2 auf der linken Fahrzeugseite beobachtet.

Der Zusammenhang zwischen der Verschiebung des Objektpunkts am Dummykopf um ca. 30 mm in Y-Richtung und der daraus resultierenden Änderung der Länge der Strecke zwischen den Zielmarken auf der A-Säule und auf dem Dummykopf von etwa 10 mm wird im Folgenden untersucht. Dafür werden die relativen Änderungen zwischen der Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität in den Koordinaten der Endpunkte der Strecken für die linke und rechte Fahrzeugseite zum Zeitpunkt T_0 jeweils komponentenweise betrachtet. Die relativen Unterschiede werden aus den Differenzen zwischen den Auswertungen der beiden Zielmarken mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität ermittelt (siehe letzte Spalte in Tabelle 6-6) und sind in Tabelle 6-8 zusammengefasst.

Abstand	Unterschiede in den ermittelten Koordinaten zwischen der Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität		
	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔZ [mm]
ASL2 – DKL2	2.0	21.7	-2.5
ASR2 – DKR2	-1.0	-27.8	-1.1

Tabelle 6-8: Komponentenweise Auswertung der relativen Unterschiede in den Objektkoordinaten für die Zielmarken auf der linken und auf der rechten Fahrzeugseite zum Zeitpunkt T_0

Die in Tabelle 6-8 dargestellten Differenzen zwischen der Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität zeigen, dass sich die relativen Positionen der Zielmarken auf der linken bzw. der rechten Fahrzeugseite in X - und Z -Richtung mit ca. 2 mm nur geringfügig geändert haben. Die Differenz in Y -Richtung beträgt jedoch 21.7 mm bzw. -27.8 mm. Ohne Berücksichtigung der Asynchronität wird die Position der Zielmarke des Dummykopfs jeweils bezogen auf die Fahrzeugmitte, zu weit außen, in Richtung der B-Säule des Fahrzeugs, bestimmt.

Durch die Lage und Orientierung der jeweiligen Strecke wirken sich die großen Unterschiede in Y -Richtung nicht direkt auf die Streckenlängen aus. Dieser Effekt wird im Folgenden anhand der Strecke auf der rechten Fahrzeugseite zwischen ASR2 und DKR2 beschrieben. Da die Z -Koordinaten der Punkte ASR2 und DKR2 berechnet mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität etwa die gleichen Werte aufweisen (siehe Abbildung 6-6 und Tabelle 6-6), wird nur die Konstellation in der XY -Ebene näher betrachtet (siehe Abbildung 6-9 links). Die Strecke zwischen ASR2 und DKR2 bildet in der XY -Ebene mit der X -Achse einen Winkel von ca. 23° (siehe Abbildung 6-9 rechts). Da sich der Unterschied ΔY von ca. 28 mm mit dem Sinus des Winkels auf die Streckenlänge auswirkt, verkürzt sich die Strecke in diesem Fall nur um etwa 10 mm. Bei der Analyse des Abstands zwischen der Zielmarke DKR2 auf dem Dummykopf und der Zielmarke BSR2 auf der B-Säule des Fahrzeugs wirkt sich der Unterschied ΔY direkt auf die berechnete Streckenlänge aus, so dass der Abstand ohne Berücksichtigung der Asynchronität um ca. 28 mm zu kurz berechnet wird.

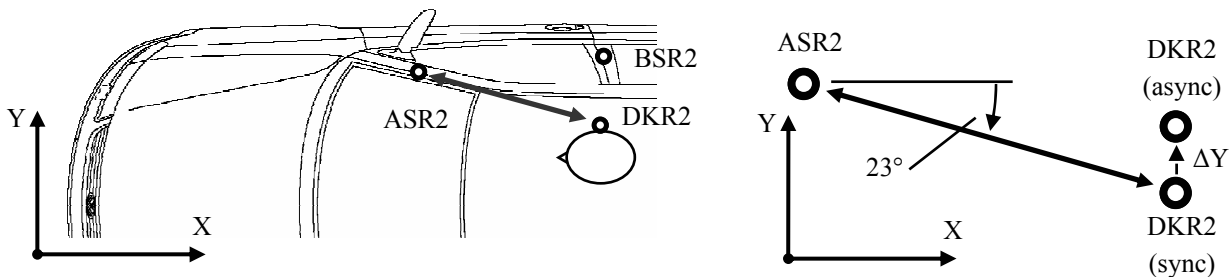


Abbildung 6-9: Auswirkung der Asynchronität auf die Berechnung der Strecke zwischen den Zielmarken ASR2 und DKR2 auf der rechten Fahrzeugseite, links: Darstellung der Lage und Orientierung der Strecke im Fahrzeug, rechts: Darstellung der Auswirkungen der Asynchronität auf die Berechnung der Streckenlänge (nicht maßstäblich)

6.3.3 Vergleich und Analyse der Ergebnisse

Beim Vergleich der Objektkoordinaten, die ohne und mit Berücksichtigung der Asynchronität im Rahmen der Auswertung ermittelt wurden, treten unterschiedliche Differenzen sowohl in den Koordinaten eines Punkts als auch zwischen den Punkten auf den A-Säulen des Fahrzeugs und den Dummyköpfen auf.

Aufgrund der Aufnahmekonstellation können die Zielmarken auf den Dummyköpfen jeweils nur in den Bildsequenzen der beiden Kameras L1 und L3 bzw. R1 und R3 gemessen werden. Die Marken auf den A-Säulen können in beiden Fällen zusätzlich noch in der Sequenz O2 gemessen werden. Daher sind die ermittelten Standardabweichungen der Objektkoordinaten bei der Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität unterschiedlich groß. Die

extremen Unterschiede in den Y -Koordinaten der beiden Zielmarken auf den Dummyköpfen lassen sich auf die Vernachlässigung der Asynchronität in der Auswertung in Kombination mit der Aufnahmekonstellation zurückführen. Da die Punkte auf den Dummyköpfen jeweils nur in zwei Sequenzen gemessen werden können und sich die Punkte annähernd in ihren Epipolarebenen bewegen, führt die Vernachlässigung der Asynchronität zu einer systematischen Verschiebung der Objektpunkte. Bei dieser Versuchsauswertung sind die systematischen Verschiebungen der Zielmarken auf den beiden Dummyköpfen auf beiden Fahrzeugseiten in der gleichen Größenordnung und sind auch beide, bezogen auf die Fahrzeugmitte, jeweils nach außen gerichtet. Dies ist dadurch zu erklären, dass zum einen bei der Aufnahme von links die Asynchronität zwischen L1 und L3 etwa doppelt so groß ist wie die Asynchronität zwischen R1 und R3. Zum anderen ist aber auch die Aufnahmebasis zwischen den Kameras L1 und L3 auch etwa doppelt so groß wie die Basis zwischen R1 und R3. Dadurch wirken sich die unterschiedlichen Asynchronitäten als etwa gleich große systematische Verschiebungen der Objektpunkte in den jeweiligen Epipolarebenen aus (siehe Formel (2.1) und (2.2)). Bezogen auf die Bewegungsrichtung nimmt jeweils die linke der beiden Kameras einer Fahrzeugseite die Bewegung des Objektpunkts früher auf als die rechte Kamera. Dadurch werden die Objektpunkte systematisch in Richtung der Kameras, also auf die Fahrzeugmitte bezogen nach außen, verschoben.

Die Analyse der Unterschiede in den X -Koordinaten der vier Zielmarken zeigt, dass bei den beiden Auswertungen der Konstellation O2-R1-R3 auf der rechten Fahrzeugseite nur sehr geringe Differenzen von maximal 1.5 mm auftreten. Die Auswertungen der Kamerakonstellation O2-L1-L3 auf der linken Fahrzeugseite weisen jedoch Unterschiede in den X -Koordinaten für ASL2 von 9.3 mm und für DKL2 von 7.3 mm auf. Diese Differenzen sind auf die unterschiedlichen Zeitbezüge der Auswertungen zurückzuführen, die in Abbildung 6-10 schematisch dargestellt sind.

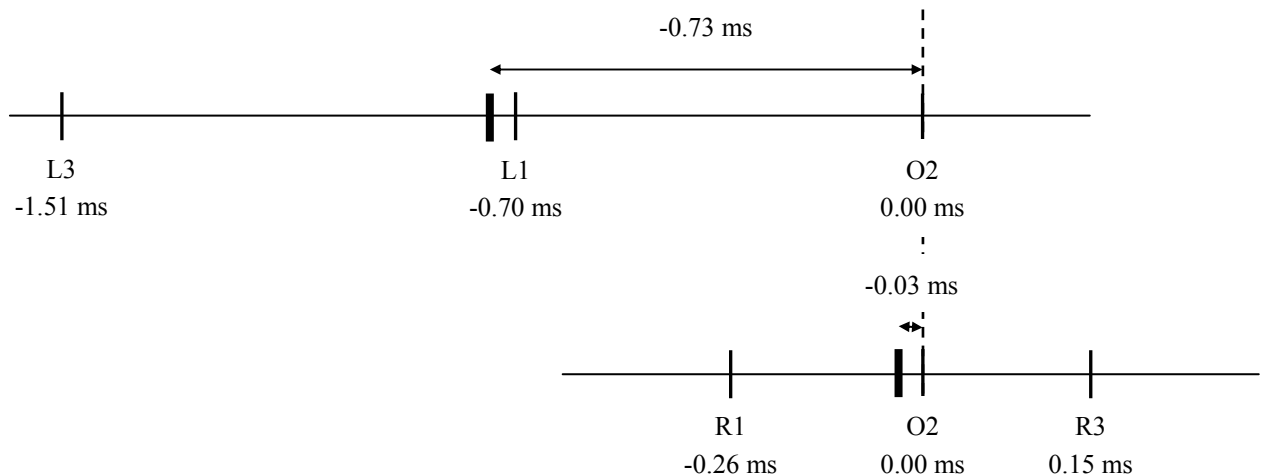


Abbildung 6-10: Darstellung der unterschiedlichen Zeitbezüge zwischen den Auswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität (nicht maßstäblich), oben: Konstellation O2-L1-L3, unten: Konstellation O2-R1-R3

Die Auswertungen mit Berücksichtigung der Asynchronität nutzen in beiden Fällen die Sequenz der Kamera O2 als Referenz, d.h. alle ermittelten Asynchronitäten beziehen sich auf die Zeitbasis der Kamera O2. Der Zeitbezug der Auswertungen ohne Berücksichtigung der Asynchronität ist der Mittelwert der unterschiedlichen Zeitbezüge der jeweiligen Kameras, der in Abbildung 6-10 jeweils als dicker schwarzer Strich gekennzeichnet ist. Für den Fall der Auswertung der Kamerakonstellation O2-L1-L3 ergibt sich somit ein Unterschied im Zeitbezug von 0.73 ms zwischen der Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität. Unter Berücksichtigung der Objektgeschwindigkeit von ca. 15.6 m/s resultiert daraus eine Verschiebung in X -Richtung von ca. 6 mm (siehe Formel (2.1) und (2.2)). Die Auswertung der Kamerakonstellation O2-R1-R3 weist einen Unterschied im Zeitbezug von 0.03 ms auf, der sich mit ca. 0.2 mm als Verschiebung in X -Richtung auswirkt und vernachlässigt werden kann. Die verbleibenden Unterschiede zwischen den X -Koordinaten der beiden Auswertungen sind ebenso wie die Unterschiede zwischen den Z -Koordinaten unter Berücksichtigung der zulässigen Standardabweichung für die Objektkoordinaten von maximal 5 mm vernachlässigbar.

Die Auswertung der Länge des Abstands zwischen der Zielmarke auf der A-Säule des Fahrzeugs und der Zielmarke auf dem Dummykopf, jeweils für die linke und rechte Fahrzeugseite, liefert eine Differenz zwischen den Ergebnissen ohne und mit Berücksichtigung der Asynchronität von 9.4 mm und 9.5 mm. In beiden Fällen ist die Strecke ohne Berücksichtigung der Asynchronität zu kurz berechnet worden. Die Analyse des Abstands über den ausgewerteten Zeitbereich zeigt, dass der Unterschied zwischen den beiden Auswerteverfahren in der Anfangsphase konstant ist und sich im Folgenden minimal um ca. 1.5 mm verringert. Die Verringerung resultiert aus der Abnahme der Geschwindigkeit der Zielmarke auf der A-Säule durch den Aufprall des Fahrzeugs auf die Defo-Barriere, da die Auswirkung der Asynchronität auf die Objektkoordinatenbestimmung direkt von der Objektgeschwindigkeit abhängig ist.

Beim Vergleich der ermittelten Abstände in den einzelnen Koordinatenrichtungen treten in *X*- und *Z*-Richtung jeweils nur geringe Unterschiede von ca. 2 mm auf. In *Y*-Richtung liegen die Unterschiede in den Streckenlängen jedoch bei 21.7 mm und -27.8 mm, die auf die Mitte des Fahrzeugs bezogen jeweils nach außen gerichtet sind. Aufgrund der Länge und der Orientierung der betrachteten Strecken im Koordinatensystem wirkt sich der große Unterschied in *Y*-Richtung von bis zu 27.8 mm nicht vollständig als Änderung der Länge des Abstands zwischen den Zielmarken auf dem Dummykopf und der A-Säule des Fahrzeugs aus. Bei der Betrachtung des Abstands vom Dummykopf in *Y*-Richtung nach außen zur B-Säule des Fahrzeugs, wirkt sich der Unterschied direkt auf den berechneten Abstand zwischen Dummykopf und B-Säule aus. Die Vernachlässigung der Asynchronität in der Auswertung führt dazu, dass in diesem Fall die Strecke zwischen Dummykopf und B-Säule um bis zu 27.8 mm zu kurz berechnet wird, da die Strecke exakt in *Y*-Richtung verläuft. Die Berechnung des Abstands zwischen den beiden Dummyköpfen bei einer Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität führt bei dieser Konstellation dazu, dass der Abstand um 49.5 mm zu lang berechnet wird.

Die zulässige Standardabweichung für die Objektkoordinaten liegt bei maximal 5 mm. Die Unterschiede in den Strecken zwischen Dummykopf und B-Säule des Fahrzeugs von 27.8 mm bzw. in der Strecke zwischen den beiden Dummyköpfen von 49.5 mm sind somit als kritisch zu bewerten und dürfen nicht vernachlässigt werden. Eine Auswertung der Bildsequenzen zur Abstandsmessung mit einem Verfahren, das die Asynchronität zwischen den Kameras vernachlässigt, könnte in diesem Fall dazu führen, dass im Rahmen der Fahrzeugentwicklung unnötige kosten- und zeitintensive Maßnahmen am Fahrzeug getroffen würden um den Abstand zwischen Dummykopf und A-Säule bzw. B-Säule zu vergrößern. Andererseits kann sich eine Vernachlässigung der Asynchronität auch in der Form auswirken, dass Abstände als zu groß berechnet werden und somit von zu guten Ergebnissen ausgegangen wird. In späteren Phasen der Entwicklung müssten dann Nachbesserungen durchgeführt werden um die Sicherheit des Fahrzeugs zu gewährleisten.

6.4 Bereitstellung der Versuchsergebnisse für den Vergleich mit der Simulation

Die photogrammetrische Bildsequenzauswertung der Versuchsfilme wird auch zum Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der Simulation des Sicherheitsversuchs eingesetzt. Bei dem Vergleich wird unter anderem ermittelt, ob sich das Fahrzeug und der Dummy mit gleicher Geschwindigkeit und in die gleiche Richtung bewegt haben, wie es in der Simulation des Versuchs prädiziert wurde. Die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung, die im Koordinatensystem der Versuchshalle vorliegen, werden dafür zunächst in das Fahrzeugkoordinatensystem im undeformierten Zustand, also zum Zeitpunkt *T0*, in dem auch die Simulation durchgeführt wurde, transformiert. Im Anschluss werden die Ergebnisse für einen visuellen Vergleich durch Überlagerung von Simulation und Versuchsfilm sowie für einen direkten Vergleich der Trajektorien der Objektkoordinaten aus Simulation und Bildsequenzauswertung aufbereitet.

Der jeweilige Versuchsfilm und das Simulationsmodell des Fahrzeugs werden für die Überlagerung entsprechend der jeweiligen inneren und äußeren Orientierung aufbereitet. Der Film wird entsprechend der Hauptpunktverschiebung und der Verzeichnungsparameter der inneren Orientierung der Kamera entzerrt. Das Simulationsmodell des Fahrzeugs wird entsprechend der äußeren Orientierung und der Kamerakonstanten perspektivisch dargestellt und dem Film überlagert. Diese Überlagerung wird für alle fünf Sequenzen durchgeführt. Der Vergleich der Trajektorien kann nach der Transformation der Versuchsergebnisse in das Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt *T0* direkt erfolgen.

Anhand der folgenden Auswertung werden die Auswirkungen einer Vernachlässigung der Asynchronität bei der photogrammetrischen Bildsequenzauswertung auf den Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Simulationsergebnissen aufgezeigt.

6.4.1 Transformation der Ergebnisse der Bildsequenzauswertung ins Fahrzeugkoordinatensystem

Die Bildsequenzauswertung der Versuchsfilme wird mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität durchgeführt. Im Anschluss werden die Ergebnisse der beiden Auswertungen, die sich auf das Koordinatensystem der Versuchshalle beziehen, zunächst in das Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt T_0 transformiert (siehe Abschnitt 4.3.3). Für die Bestimmung der Transformationsparameter werden zehn am Fahrzeug verteilte Zielmarken genutzt (siehe rote Markierungen in Abbildung 6-11).



Abbildung 6-11: Darstellung der zehn Zielmarken am Fahrzeug (rote Markierungen), die für die Bestimmung der Transformationsparameter genutzt werden, links: Ansicht der linken Fahrzeugseite, rechts: Ansicht der rechten Fahrzeugseite

Aufgrund der Orientierung der Kamera L3 konnten auf der linken Fahrzeugseite (siehe Abbildung 6-11 links) nur die Objektkoordinaten von drei Zielmarken genutzt werden. In der Ansicht der Kamera L3 (siehe Abbildung 6-1b) sind zum Zeitpunkt T_0 keine weiteren Objektpunkte, wie z.B. im Bereich der B-Säule, sichtbar.

Die berechneten Parameter für die Transformation der Ergebnisse der Bildsequenzauswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität in das Fahrzeugkoordinatensystem sind in Tabelle 6-9 zusammengefasst.

Transformations- parameter	Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Asynchronität		Ergebnisse mit Berücksichtigung der Asynchronität	
	Wert	Standard- abweichung	Wert	Standard- abweichung
X [mm]	-1356.6	19.6	-1427.2	5.9
Y [mm]	4548.2	11.8	4493.4	3.1
Z [mm]	1360.0	26.4	1347.1	6.8
Omega [°]	0.255	0.285	0.135	0.071
Phi [°]	1.208	0.305	1.028	0.102
Kappa [°]	-0.101	0.256	0.852	0.074

Tabelle 6-9: Vergleich der Parameter für die Transformation der Ergebnisse der Bildsequenzauswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität in das Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt T_0

Bei der Transformation der Ergebnisse der Bildsequenzauswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität sind die Standardabweichungen der Parameter etwa um den Faktor vier größer als bei der Transformation der Koordinaten, bei deren Berechnung die Asynchronität berücksichtigt wurde (siehe Tabelle 6-9). Dies deutet darauf hin, dass die

ineinander transformierten Koordinatensysteme größere Spannungen aufweisen. Diese sind in Form der Restklaffungen an den Transformationspunkten deutlich zu erkennen. Die Restklaffungen an sechs der zehn Transformationspunkte (siehe Abbildung 6-11) der beiden Transformationen sind in Tabelle 6-10 zusammengefasst. Zusätzlich sind die Restklaffungen für die Transformation der Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Asynchronität in Abbildung 6-12 graphisch überhöht dargestellt.

Restklaffung	Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Asynchronität			Ergebnisse mit Berücksichtigung der Asynchronität		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
ASL1	11.4	9.8	3.4	-2.7	0.8	0.1
ASL3	10.2	21.0	7.1	0.5	3.4	2.2
SLV1	10.0	26.2	-4.2	-0.5	-1.8	-1.7
ASR1	-5.7	5.3	-0.3	0.9	1.0	1.0
ASR3	-4.2	15.1	3.0	1.3	0.4	2.3
SRV1	-10.0	-16.2	-6.7	0.9	5.1	-0.9

Tabelle 6-10: Vergleich der Restklaffungen bei der Koordinatentransformation der Ergebnissen der beiden Bildsequenzauswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität in das Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt T_0

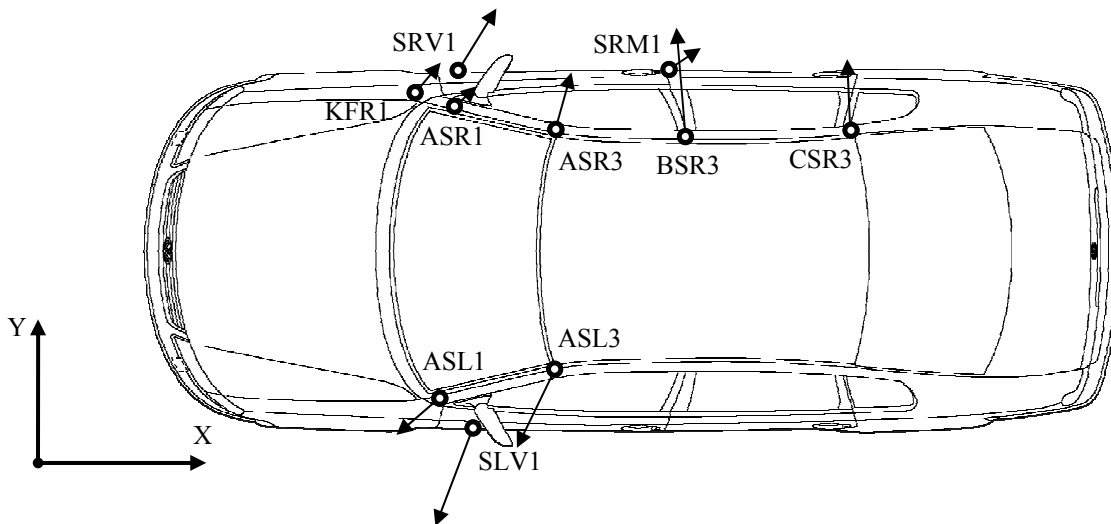


Abbildung 6-12: Darstellung der Restklaffungen der Transformation der Ergebnisse der Bildsequenzauswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität in das Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt T_0 , überhöhte Darstellung der Restklaffungen

Die Restklaffungen an den Transformationspunkten (siehe Tabelle 6-10) sind bei der Transformation der Koordinaten, bei deren Berechnung die Asynchronität vernachlässigt wurde, deutlich größer als bei der Transformation der Koordinaten, bei deren Berechnung die Asynchronität berücksichtigt wurde. Die Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Asynchronität zeigen weiterhin systematische Unterschiede in den Restklaffungen an den Transformationspunkten (siehe Abbildung 6-12). So sind alle Restklaffungen der Punkte auf der linken Fahrzeugseite in X -Richtung positiv und die der Punkte auf der rechten Fahrzeugseite in den X -Werten negativ. Die Unterschiede in den Y -Werten der Restklaffungen liegen mit bis zu 26 mm am Objektpunkt SLV1 deutlich über der zulässigen Standardabweichung für die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung von maximal 5 mm. Die Unterschiede in den Z -Komponenten der Restklaffungen sind geringer, jedoch mit bis zu 7 mm ebenfalls oberhalb der Anforderung an die Standardabweichung von maximal 5 mm.

Die Restklaffungen an den Transformationspunkten zeigen bei der Transformation der Objektkoordinaten, bei deren Berechnung die Asynchronität berücksichtigt wurde, keine systematischen Effekte (siehe Tabelle 6-10). Die Restklaffungen liegen an allen Transformationspunkten im Rahmen der geforderten Standardabweichung von maximal 5 mm.

6.4.2 Aufbereitung der Versuchsergebnisse für den Vergleich mit der Simulation des Versuchs

Die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung müssen, nachdem sie im Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt T_0 vorliegen, für den direkten Vergleich von Simulation und Versuch aufbereitet werden. Der Vergleich erfolgt für jede Bildsequenz durch die Überlagerung des Versuchsfilms mit der Simulation. Dazu werden die Parameter der inneren und äußeren Orientierung der jeweiligen Kamera genutzt. Die Parameter der äußeren Orientierung werden vorab zusammen mit den Objektpunktkoordinaten in das Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt T_0 transformiert. In Abbildung 6-13 sind die Überlagerungen der Simulation über den Versuchsfilm der Kamera O2 mit den transformierten Ergebnissen der Bildsequenzauswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität dargestellt.

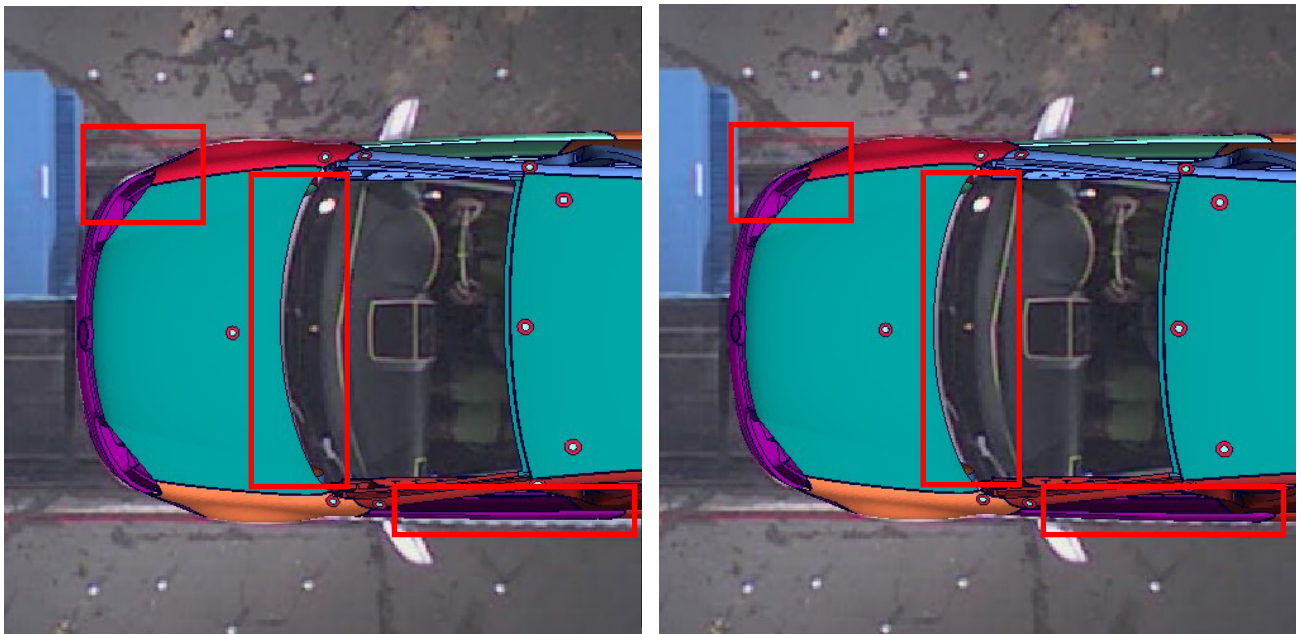
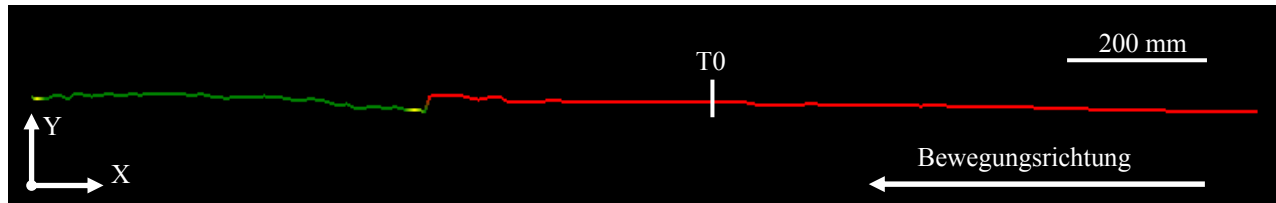


Abbildung 6-13: Vergleich der Überlagerungen des Versuchsfilms der Kamera O2 mit der Simulation sowie der Kennzeichnung von sichtbaren Unterschieden (rote Rahmen), links: Überlagerung auf Basis der Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Asynchronität, rechts: Überlagerung auf Basis der Ergebnisse mit Berücksichtigung der Asynchronität

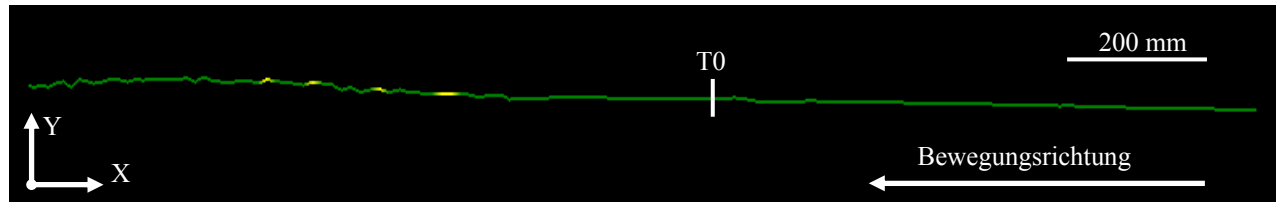
Die beiden in Abbildung 6-13 dargestellten Überlagerungen zeigen die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Auswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität. Bei der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität (Abbildung 6-13 links) ist das überlagerte Modell der Simulation gegenüber der Darstellung im Versuchsfilm um die Z-Achse verdreht. Die Verdrehung liegt bei ca. 1° . Die Verdrehung ist auch in Tabelle 6-9 beim Vergleich der Transformationsparameter in den Werten für den Winkel κ erkennbar. In Abbildung 6-13 (siehe rote Rahmen) ist die Verdrehung im rechten Bereich der Stoßstange, im Bereich des Übergangs zwischen Motorhaube und Frontscheibe sowie im Bereich der linken Fahrzeugseite sichtbar. Die Überlagerung der Simulation über den Versuchsfilm mit den Ergebnissen der Auswertung, bei der die Asynchronität berücksichtigt wurde, zeigt keine systematischen Unterschiede (siehe rote Rahmen in Abbildung 6-13 rechts).

Neben dem visuellen Vergleich durch Überlagerung von Simulation und Versuchsfilm werden auch die Trajektorien der Zielmarken am Fahrzeug aus Simulation und Versuch miteinander verglichen. In Abbildung 6-14 sind die

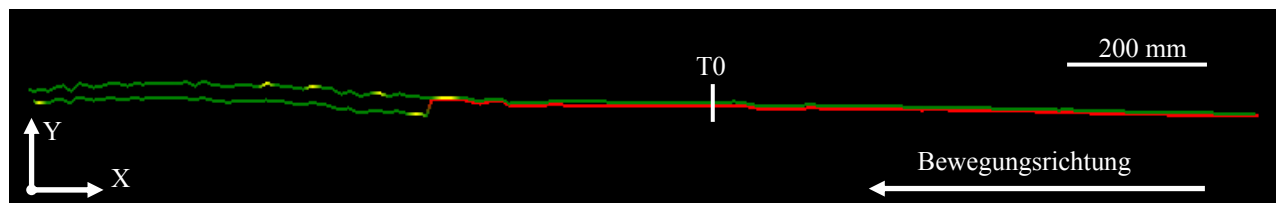
Auswirkungen der Vernachlässigung der Asynchronität exemplarisch für die Trajektorien der Zielmarke ASL1 auf der linken A-Säule des Fahrzeugs, die mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität berechnet wurden, dargestellt.



a) Trajektorie der Zielmarke ASL1 berechnet ohne Berücksichtigung der Asynchronität



b) Trajektorie der Zielmarke ASL1 berechnet mit Berücksichtigung der Asynchronität



c) Überlagerte Darstellung der Trajektorien berechnet mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität

Abbildung 6-14: Darstellung der Trajektorien der Zielmarke ASL1 auf der linken A-Säule des Fahrzeugs berechnet mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität sowie der überlagerten Darstellung, jeweils in der XY-Ebene, Farbgebung entsprechend der Standardabweichung (rot: größer als 5 mm, gelb: 2.5-5 mm, grün: kleiner als 2.5 mm)

Die in Abbildung 6-14 dargestellten Trajektorien sind entsprechend der ermittelten Standardabweichung der Objektkoordinaten eingefärbt: Rot dargestellte Punkte haben eine Standardabweichung der Objektkoordinaten von größer als 5 mm, gelb dargestellte Punkte haben eine Standardabweichung zwischen 2.5 mm und 5 mm und die grün abgebildeten Punkte haben eine Standardabweichung, die kleiner als 2.5 mm ist. In Abbildung 6-14a ist die Trajektorie der Zielmarke ASL1 auf der linken A-Säule des Fahrzeugs, die ohne Berücksichtigung der Asynchronität berechnet wurde, dargestellt. Die Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten der Trajektorie liegen zu Beginn der Sequenz über dem geforderten Wert von 5 mm (siehe roter Bereich der Trajektorie im rechten Teil der Abbildung 6-14a). Im letzten Drittel der Sequenz (siehe grüner Bereich der Trajektorie im linken Teil der Abbildung 6-14a) liegen die Standardabweichungen unterhalb der geforderten 5 mm. Die Trajektorie weist jedoch im letzten Drittel des betrachteten Zeitraums einen Sprung von ca. 30 mm in Y-Richtung auf.

Die in Abbildung 6-14b dargestellte Trajektorie der Zielmarke ASL1, bei deren Berechnung die Asynchronität berücksichtigt wurde, liegt im gesamten Verlauf unterhalb der maximal zulässigen Standardabweichung von 5 mm. Des Weiteren sind auch keine Sprünge in der Trajektorie zu erkennen.

Die Überlagerung der beiden Trajektorien in Abbildung 6-14c zeigt, dass die Trajektorien im rechten Bereich der Abbildung, also zu Beginn der Sequenz, in ihrer Lage gut übereinstimmen. Durch den Sprung der Trajektorie im letzten Drittel der betrachteten Bildsequenz, die ohne Berücksichtigung der Asynchronität berechnet wurde, entsteht ein Versatz zwischen den Trajektorien in diesem Zeitbereich von ca. 30 mm.

6.4.3 Analyse der Ergebnisse der Auswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität

Bei der Koordinatentransformation der Auswertungen ohne Berücksichtigung der Asynchronität sind die Standardabweichungen der Transformationspunkte etwa um den Faktor vier größer als bei der Transformation mit den Objektkoordinaten, bei deren Berechnung die Asynchronität berücksichtigt wurde. Die Restklaffungen an den Transformationspunkten zeigen bei der Transformation der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität systematische Effekte, deren Auswirkung nicht vernachlässigt werden darf. Die Restklaffungen der X -Koordinaten der Transformationspunkte sind auf der linken Fahrzeugseite in X -Richtung positiv und auf der rechten negativ. Die Ursache dafür liegt im unterschiedlichen Zeitbezug der Auswertungen der linken und der rechten Fahrzeugseite (siehe Abschnitt 6.3.3). Bei der Auswertung, bei der die Asynchronität vernachlässigt wurde, müssen die unterschiedlichen Zeitbezüge der Trajektorien der Objektpunkte auf der linken und rechten Fahrzeugseite in der Transformation gemittelt werden. Dies führt zu den gegenläufigen Restklaffungen der Transformationspunkte in X -Richtung.

Beim Vergleich der Überlagerungen mit den Auswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität zeigt sich eine Verdrehung um ca. 1° um die Z -Achse des Fahrzeugkoordinatensystems zum Zeitpunkt T_0 . Diese Verdrehung ist auch beim Winkel κ der Transformationsparameter zu erkennen und resultiert wahrscheinlich aus der Verteilung der Transformationspunkte auf dem Fahrzeug. Auf der rechten Fahrzeugseite können auch im hinteren Bereich des Fahrzeugs drei Objektpunkte für die Transformation genutzt werden. Die linke Seite weist aufgrund fehlender Sichtbarkeit zum Zeitpunkt T_0 im hinteren Fahrzeugbereich keine für die Transformation nutzbaren Objektpunkte auf. Da die Objektpunkte auf der rechten hinteren Fahrzeugseite nur in den Sequenzen R1 und R3 gemessen werden konnten, wurden sie durch die Vernachlässigung der Asynchronität systematisch in Richtung der Kameras R1 und R3, also bezogen auf die Fahrzeugmitte nach außen, verschoben. Die Objektpunkte im vorderen Bereich des Fahrzeugs sind in den Sequenzen R1, R3 und O2 gemessen worden und erfahren deshalb nur eine minimale Verschiebung. Durch die Verschiebung der Objektpunkte im hinteren rechten Bereich wird das Fahrzeug bei der Transformation insgesamt verdreht. Die Verdrehung von 1° in der Lage des Fahrzeugs zum Zeitpunkt T_0 bewirkt nach einer Bewegung des Fahrzeugs ab dem Zeitpunkt T_0 von etwa einem Meter einen Versatz von ca. 17 mm in Y -Richtung.

Beim Vergleich der Trajektorien der Zielmarke ASL1 auf der linken A-Säule des Fahrzeugs treten zwei unterschiedliche Effekte auf. Zum einen sind die Standardabweichungen der Punkte der Trajektorie, bei deren Berechnung die Asynchronität vernachlässigt wird, in der Anfangsphase deutlich größer als bei der Trajektorie, bei der die Asynchronität berücksichtigt wird. Jedoch weisen beide Trajektorien in dieser Phase in den Objektkoordinaten nur geringe Unterschiede auf. Im weiteren Verlauf tritt ein Sprung in der Trajektorie, bei deren Berechnung die Asynchronität vernachlässigt wurde, von ca. 30 mm in Y -Richtung auf. Die berechneten Standardabweichungen sind dagegen ab diesem Zeitpunkt deutlich geringer und liegen unterhalb der maximal zulässigen Standardabweichung von 5 mm. Der Sprung in der Trajektorie entsteht dadurch, dass ab diesem Zeitpunkt der Objektpunkt ASL1 nicht mehr in der Sequenz der Kamera O2 gemessen werden konnte. Somit liegen nur noch die Messungen in den Sequenzen der Kameras L1 und L3 vor. Aufgrund der Kamerakonstellation von L1 und L3, bei der die Bewegungsrichtung des Objektpunkts innerhalb seiner Epipolarebene liegt, wirkt sich die Asynchronität in Form einer systematischen Verschiebung aus. Die zugehörigen Standardabweichungen sind nicht vergrößert, da sich die Abbildungsstrahlen in der Epipolarebene unabhängig von der vorliegenden Asynchronität stets in einem Punkt schneiden.

6.5 Analyse und Bewertung der Versuchsergebnisse

Bei diesem Versuch zur Verifizierung des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität werden Bildsequenzen eines Sicherheitsversuchs verwendet. Die fünf räumlich um das Messvolumen verteilten Kameras nehmen das Fahrzeug mit einer Aufnahmefrequenz von 1 000 Hz auf. Das Fahrzeug bewegt sich im Versuch mit einer Geschwindigkeit von 15.6 m/s (ca. 56 km/h).

Im ersten Teil der Auswertung wurde die korrekte Funktion zur Modellierung der Asynchronität festgelegt. Dazu werden die Ergebnisse der Modellierung mit drei verschiedenen Korrekturfunktionen miteinander verglichen und bewertet. Aufgrund statistischer Betrachtungen ist eine lineare Funktion zur Modellierung der Asynchronität ausreichend, da die Terme höherer Ordnung nicht signifikant von Null verschieden bestimmt werden. Daher werden in

den weiteren Untersuchungen nur die Modellierungen mit der linearen Funktion und mit dem konstanten Zeit-Offset zur Modellierung der Asynchronität überprüft. Die Untersuchung der Auswirkung der Modellierungen auf eine Streckenlängenberechnung zeigte keine signifikanten Unterschiede. Die Reduzierung der Anzahl der Bilder zur Berechnung der Asynchronität und deren Variation innerhalb der gesamten Bildsequenz wies ebenfalls keine signifikanten Unterschiede auf. Die durchgeführten Analysen bestätigen, dass eine Modellierung der Asynchronität mit einem konstanten Zeit-Offset unter Berücksichtigung der Anforderung an die Standardabweichung ausreichend ist und korrekte Ergebnisse liefert. Für die folgenden Analysen erfolgte die Modellierung der Asynchronität daher mit einem konstanten Zeit-Offset.

Im zweiten Teil der Auswertung wurde die Plausibilität der ermittelten Asynchronitäten zwischen den Kameras überprüft. Die Unterschiede in den berechneten Asynchronitäten lagen bei maximal 0.02 ms und sind somit unter Berücksichtigung der Genauigkeitsanforderungen vernachlässigbar. Bei der Analyse der Asynchronität wurde weiterhin festgestellt, dass das zur Synchronisation der Kameras eingesetzte Frame-Sync Verfahren durch nicht reproduzierbare Effekte beeinflusst wurde und entgegen der Theorie eine Asynchronität von bis 1.5 ms (1.5 Bilder) auftrat. Die Reduzierung der Anzahl aufeinander folgender Bilder ergab, dass in diesem Versuch erst bei einer Reduzierung auf weniger als 10 aufeinander folgende Bilder die Anforderung an die Standardabweichung von maximal 5 mm für die Länge der Referenzstrecke auf dem Fahrzeug überschritten wurde.

In weiteren Untersuchungen wurden die Auswirkungen der Vernachlässigung der Asynchronität bei der Bildsequenzauswertung von Sicherheitsversuchen betrachtet. Dafür wurde zunächst der Abstand zwischen den Zielmarken auf dem Dummykopf und auf der A-Säule des Fahrzeugs mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität ausgewertet und analysiert. Die Auswertung der Länge des Abstands zwischen den beiden Zielmarken lieferte bei der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität eine um bis zu 9.5 mm zu kurze Streckenlänge. Bei Betrachtung der Unterschiede in den einzelnen Komponenten der Koordinaten traten in *X*- und *Z*-Richtung nur geringe Unterschiede von ca. 2 mm auf. Der Hauptanteil des Unterschieds lag bei dieser Auswertung in den *Y*-Komponenten mit bis zu 27.8 mm. Bei der Berechnung des Abstands vom Dummykopf zur B-Säule wirkt sich die Vernachlässigung der Asynchronität aufgrund der Orientierung der berechneten Strecke direkt als Verkürzung der Länge um bis zu 27.8 mm aus. Die Vernachlässigung der Asynchronität führt dazu, dass die Abstände zu kurz berechnet werden und daraus eventuell falsche Schlüsse für die weitere Fahrzeugentwicklung abgeleitet werden.

In einer weiteren Untersuchung wurde die Auswirkung der Vernachlässigung der Asynchronität auf den Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen aus einer Simulationsberechnung des Versuchs analysiert. Bei der Koordinatentransformation der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität sind die Standardabweichungen der Transformationsparameter etwa um den Faktor vier größer als bei der Transformation mit den Objektkoordinaten, bei deren Berechnung die Asynchronität berücksichtigt wurde. Die Restklaffungen an den Transformationspunkten weisen bei der Transformation der Auswertung ohne Berücksichtigung der Asynchronität systematische Effekte auf. Beim Vergleich der Überlagerungen der Versuchfilme mit dem Simulationsmodell jeweils auf Basis der Ergebnisse der Auswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität zeigt sich durch die Vernachlässigung der Asynchronität eine Verdrehung um ca. 1° um die *Z*-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems zum Zeitpunkt *T0*. Aus dieser Verdrehung des Fahrzeugs von ca. 1° zum Zeitpunkt *T0* resultiert nach einer Bewegung des Fahrzeugs von etwa einem Meter einen Versatz von ca. 17 mm in *Y*-Richtung. Beim Vergleich der Trajektorien traten durch die Vernachlässigung der Asynchronität zwei unterschiedliche Effekte auf. Im ersten Teil der Trajektorie kam es durch die Vernachlässigung der Asynchronität zu einer Vergrößerung der Standardabweichungen der Objektkoordinaten. Im zweiten Teil der Trajektorie trat von einem Bild zum nächsten ein systematischer Versatz von ca. 30 mm auf, da ab diesem Zeitpunkt der Objektpunkt nur noch in den beiden Bildsequenzen L1 und L3 von der linken Seite gemessen werden konnte und nicht mehr in der Sequenz O2 von oben.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen deutlich, dass die Bildsequenzauswertung von Sicherheitsversuchen mit dem neuen Verfahren zur Berücksichtigung der Asynchronität möglich ist und die Asynchronität korrekt berücksichtigt werden kann. Unter Berücksichtigung der Asynchronität kann die Anforderung an die Standardabweichung von maximal 5 mm für die Objektkoordinaten erzielt werden. Ohne Berücksichtigung der Asynchronität ergeben sich systematische Fehler in den Objektkoordinaten von bis zu 27.8 mm.

7 Bewertung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein neues Verfahren zur dreidimensionalen photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren vorgestellt und im Rahmen von praktischen Versuchen verifiziert.

Bei diesem Verfahren sind keine Hardware-Komponenten zur Synchronisation erforderlich. Die Synchronisation der Bildsequenzen wird über einen softwarebasierten Ansatz durchgeführt, bei dem die Messungen von Objektpunkten in den Bildern asynchron aufgenommener Bildsequenzen im Rahmen einer Bündelausgleichung synchronisiert werden. Die Asynchronität wird dazu über eine Korrekturfunktion modelliert und in Form eines Interpolationsfaktors in das funktionale Modell der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen integriert. Die Modellierung der Asynchronität erfolgt im Objektraum. Die korrekte Position eines Objektpunkts wird auf seiner dreidimensionalen Trajektorie im Objektraum entsprechend der Asynchronität interpoliert. Die Parameter der Korrekturfunktion bzw. des Interpolationsfaktors, die die Asynchronität beschreiben, werden in der Ausgleichung als unbekannte Parameter gemeinsam mit den Objektkoordinaten bestimmt.

Zur Verifizierung des Verfahrens wurden zwei Versuche ausgewertet und analysiert. Beim ersten Versuch wurde eine sich drehende dreidimensionale SAE-Testtafel mit zwei digitalen Highspeed-Kameras mit einer Aufnahme Frequenz von 1 000 Hz aufgenommen. Im ersten Teil der Auswertung des Versuchs wurde die theoretische Genauigkeit des Verfahrens ermittelt. Zu diesem Zweck wurde die Bewegung eines Objektpunkts auf der Tafel mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität ausgewertet. Durch die Verwendung des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität konnten die Auswirkungen der Asynchronität auf die Objektkoordinatenbestimmung praktisch vollständig eliminiert werden. Die berechnete Asynchronität von -0.78 ms weist nur einen vernachlässigbaren Unterschied von 0.01 ms zum Referenzwert für die Asynchronität auf. Die Standardabweichung der ermittelten Objektkoordinaten konnte im Vergleich zu den Ergebnissen, die ohne Berücksichtigung der Asynchronität erzielt wurden, um den Faktor 10 verbessert werden. Im zweiten Teil der Auswertung wurde die empirische Genauigkeit des Verfahrens bestimmt. Dafür wurde der Abstand zwischen zwei Objektpunkten auf der SAE-Testtafel mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität für jeden Zeitpunkt der Sequenz ermittelt. Durch die Vernachlässigung der Asynchronität treten systematische Längenänderungen von bis zu 14 mm bei einer Gesamtlänge der Strecke von 520.16 mm auf. In den Ergebnissen der Auswertung mit dem neuen Verfahren sind keine systematischen Längenänderungen enthalten. Der Unterschied von 0.01 mm zwischen der mittleren berechneten Länge und der Solllänge kann vernachlässigt werden. Die Standardabweichung des Einzelwerts der Strecke ergibt einen Wert von 0.51 mm. Dieser kann für die vorliegende Versuchskonstellation als empirische Genauigkeit des Verfahrens zur Berücksichtigung der Asynchronität angesehen werden. Im dritten Teil der Auswertung wurde die Auswirkung der Reduzierung der Anzahl aufeinander folgender Bilder auf die Ergebnisse der Auswertung mit Berücksichtigung der Asynchronität analysiert. Bei einer Reduzierung auf fünf aufeinander folgende Bilder tritt eine Variation in der Asynchronität von 0.1 ms und eine Variation in der Länge der Strecke von 1.5 mm auf. Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen, dass das entwickelte Verfahren für die Auswertung der zwei asynchron aufgenommenen Bildsequenzen geeignet ist. Die Standardabweichung der ermittelten Objektkoordinaten entspricht der Standardabweichung, die mit einer Auswertung von synchron aufgenommenen Bildsequenzen erzielt wird. Die Auswirkungen einer Vernachlässigung der Asynchronität können durch die Verwendung des neuen Verfahrens praktisch vollständig eliminiert werden.

Im zweiten Versuch wurden die Bildsequenzen eines Sicherheitsversuchs analysiert. Bei dem Versuch wurde ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 15.6 m/s gegen eine deformierbare Barriere gefahren. In der Versuchsauswertung wurden Sequenzen von fünf digitalen Highspeed-Kameras genutzt, die die Bewegung des Fahrzeugs mit einer Aufnahme Frequenz von 1 000 Hz erfassten. Die Modellierung der Asynchronität erfolgte für alle Kameras in Bezug zu einer Referenzkamera mit einem konstanten Zeit-Offset. Die Asynchronitäten zwischen den Kameras wurden im Rahmen von verschiedenen Auswertungen auf ihre Plausibilität untersucht. Probleme traten bei den Bildsequenzauswertungen von Zwei-Kamerakonstellationen auf, bei denen die Bewegungsrichtungen der einzelnen Objektpunkte über den analysierten Zeitraum ausschließlich innerhalb der jeweiligen Epipolarebenen verliefen. Bei

diesen Konstellationen versagt das neue Verfahren. In der weiteren Auswertung des Sicherheitsversuchs wurden für die Fahrzeugentwicklung relevante Analysen durchgeführt und die Unterschiede zwischen der Auswertung mit und ohne Berücksichtigung der Asynchronität einander gegenübergestellt. Die Anforderung an die Standardabweichung der ermittelten Objektkoordinaten beträgt bei dieser Versuchsart 5 mm. Im ersten Teil der Versuchsanalyse wurde der Abstand eines Dummykopfs zur A- und B-Säule des Fahrzeugs analysiert. Durch die Vernachlässigung der Asynchronität treten im Rahmen der Auswertung Fehler von bis zu 9.5 mm im Abstand des Dummykopfs zur A-Säule des Fahrzeugs und von bis zu 27.8 mm im Abstand des Dummykopfs zur B-Säule auf. Die Vernachlässigung der Asynchronität führt dazu, dass die Abstände zu kurz berechnet werden und daraus eventuell falsche Schlüsse für die weitere Fahrzeugentwicklung abgeleitet werden. Durch die Verwendung des neuen Verfahrens konnten die Abstände präzise und zuverlässig ermittelt werden. Im zweiten Teil der Versuchsanalyse wurde die Auswirkung der Vernachlässigung der Asynchronität auf die Aufbereitung der Ergebnisse der Bildsequenzauswertung für den Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und der Simulation des Versuchs betrachtet. Ohne Berücksichtigung der Asynchronität treten bei den Versuchsergebnissen systematische Verschiebungen der Objektkoordinaten im Bereich von bis zu 27.8 mm auf. Ein präziser Vergleich zwischen Simulation und Versuch ist auf Basis dieser Ergebnisse nicht möglich. Mit den Ergebnissen der Auswertung mit Berücksichtigung der Asynchronität wird ein exakter und zuverlässiger Vergleich zwischen Simulation und Versuch ermöglicht.

Die Analysen der Rotation der SAE-Testtafel und des Fahrzeugsicherheitsversuchs zeigen die Eignung des Verfahrens für die dreidimensionale photogrammetrische Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren. Das entwickelte Verfahren wurde für die Bildsequenzauswertung von Fahrzeugsicherheitsversuchen konzipiert. Es ist jedoch nicht auf diese Anwendung beschränkt, sondern kann auch bei anderen Bildsequenzauswertungen von Mehrkamerasystemen, wie z.B. der menschlichen Bewegungsanalyse, eingesetzt werden, solange die Auswertung mittels Punktverfolgungsverfahren durchgeführt wird. Bei Anwendungen wie beispielsweise der Bestimmung von Wellenoberflächen (SANTEL 2006) oder der flächenhaften Deformationsanalyse von Bauteilen (SCHMIDT et al. 2005, GODDING et al. 2006) werden keine Punkte oder Flächenelemente über die Sequenz verfolgt. Das hier beschriebene Verfahren kann somit nicht zur Auswertung dieser Anwendungen genutzt werden, da für eine korrekte Bestimmung der Asynchronität bei dem vorgestellten Verfahren jeweils entlang der Trajektorien der Objektpunkte interpoliert wird.

Eine weitere Anforderung an das neue Verfahren zur Berücksichtigung der Asynchronität ist, dass bei einer Kamerakonstellation bestehend aus zwei Kameras die Bewegungsrichtung mindestens eines zu analysierenden Objektpunkts nicht ausschließlich innerhalb seiner Epipolarebene verläuft. Ansonsten kann die Asynchronität nicht korrekt ermittelt werden und die Auswertung liefert keine Ergebnisse.

Wird bei der Bildsequenzauswertung anstelle der Bestimmung der äußeren Orientierungen über Passpunkte die Orientierung der Kameras über die bewegten Objektpunkte ermittelt, dürfen die auszuwertenden Objektpunkte keine gleichförmige Bewegung ausführen. Die Objektpunkte dürfen sich nicht von einem Zeitpunkt zum jeweils nächsten über die gleiche dreidimensionale Helmert-Transformation ineinander überführen lassen. In diesem Fall sind die Asynchronität und die Objektbewegung direkt miteinander korreliert und die Ausgleichung liefert keine oder falsche Ergebnisse. Zur Vermeidung dieses Effekts muss sich mindestens ein Objektpunkt zu einem Zeitpunkt anders als die anderen bewegen, sodass sich nicht alle Objektpunkte über eine Koordinatentransformation ohne Restklaffungen an den Transformationspunkten ineinander überführen lassen.

Bei dem in dieser Arbeit beschriebenen Ansatz wird entlang der Trajektorien der Objektpunkte im Objektraum linear interpoliert. Diese Interpolation liefert exakte Ergebnisse solange sich die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit von einem Bild der Sequenz zum nächsten nicht signifikant ändert. Unstetigkeitsstellen in der Objektbewegung oder stark wechselnde Bewegungsrichtungen führen zu fehlerhaften Ergebnissen, da die Teilstücke der Trajektorien der Objektpunkte eine stark unterschiedliche Ausrichtung haben. Treten große Unterschiede in der Bewegung auf, kann statt einer linearen Interpolation entlang der Trajektorien auch ein anderer Ansatz, z.B. über Splines, gewählt werden.

Die photogrammetrische Bildsequenzauswertung erfolgt bei dem hier eingesetzten Verfahren über eine gemeinsame Ausgleichung der Messungen aller Objektpunkte in allen Bildern und zu allen Zeitpunkten. Die Parameter der

Asynchronität, die in Form einer Korrekturfunktion in das funktionale Modell der Ausgleichung integriert werden, werden durch alle Beobachtungen gestützt. Dadurch werden Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten miteinander kombiniert. Jedoch werden in der Ausgleichung bei diesem Ansatz stets nur zwei aufeinander folgende Zeitpunkte eines Objektpunkts direkt miteinander in Beziehung gesetzt, da zwischen ihnen entsprechend der Asynchronität die korrekte Position interpoliert wird. Die Beziehungen zwischen mehr als zwei Objektpunkten werden hier nicht ausgenutzt.

Ein möglicher Ansatz zur Erweiterung des Verfahrens ist die Implementierung von Bewegungsmodellen, bei denen die Beziehungen zwischen verschiedenen Objektpunkten in Form von Bedingungen genutzt werden. Des Weiteren können auch Bedingungen für die einzelnen berechneten Trajektorien der Objektpunkte aufgestellt werden. So kann sichergestellt werden, dass sich ein Objektpunkt nur mit einer bestimmten Geschwindigkeit und in eine bestimmte Richtung bewegen kann. Bei Objektpunkten auf einer Fahrzeugtür ist die Bewegung z.B. durch die Fahrzeugbewegung und bei einer Deformation der Tür durch die Materialeigenschaften der Tür vorgegeben. Zwei Objektpunkte auf der gleichen Tür können sich somit nicht völlig unabhängig voneinander bewegen. Dieses zusätzliche Wissen aus den Bildsequenzen wird bei dem vorgestellten Auswerteverfahren nicht verwendet. Durch die Ausnutzung von zusätzlichem Modellwissen, z.B. in Form der relativen Position von Objektpunkten zueinander, der möglichen Verformung oder Bewegung von Objekten, werden die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung präziser und zuverlässiger.

Das beschriebene Verfahren zur exakten dreidimensionalen photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren hat durch experimentelle Versuche die Eignung für die Bildsequenzauswertung von Sicherheitsversuchen belegt. Durch die Berücksichtigung der Asynchronität in der Auswertung kann die Anforderung an die Standardabweichung von maximal 5 mm für die Objektkoordinaten eingehalten werden. Die Standardabweichungen der mit dem neuen Verfahren ermittelten Objektkoordinaten entsprechen den Standardabweichungen, die mit einer Auswertung von synchron aufgenommenen Bildsequenzen erzielt werden. Die Auswirkungen der Asynchronität werden somit durch das neue Verfahren für diese Anwendung hinreichend eliminiert.

8 Literatur

- D'APUZZO, N. (2003). *Surface measurement and tracking of human body parts from multi station video sequences*. Dissertation, Technische Wissenschaften ETH Zürich, Nr. 15271, Mitteilungen / Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 81, 147 Seiten.
- BROWN, D.C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, Vol. 37, No. 8, S. 855-866.
- CARCERONI, R.L., PÁDUA, F.L.C., SANTOS, G.A.M.R., KUTULAKOS, K.N. (2004). Linear sequence-to-sequence alignment. *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Washington, D.C., USA, Vol. 1, S. 746-753.
- CASPI, Y., IRANI, M. (2000). A step towards sequence-to-sequence alignment. *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Hilton Head Island, South Carolina, USA, Vol. 2, S. 682-689.
- CASPI, Y., IRANI, M. (2001). Alignment of non-overlapping sequences. *Proceedings 8th International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Vancouver, B.C., Canada, Vol. 2, S. 76-83.
- CASPI, Y., SIMAKOV, D., IRANI, M. (2002). Feature-based sequence-to-sequence matching. *Proceedings Workshop on Vision and Modelling of Dynamic Scenes*, Copenhagen, Denmark, 18 Seiten.
- FRISCH, N. (2004). *Verfahren zur Unterstützung der Arbeitsabläufe bei der Crash-Simulation im Fahrzeugbau*. Dissertation, Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik, Universität Stuttgart, 153 Seiten.
- GODDING, R. (1993). Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF)*, Heft 2/1993, S. 82-90.
- GODDING, R., LUHMANN, T., WENDT, A. (2006). 4d surface matching for high-speed stereo sequences. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 5*, Dresden, 6 Seiten (CD-ROM).
- HARTLEY, R., ZISSERMANN, A. (2003). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second Edition, Cambridge University Press, 645 Seiten.
- HASTEDT, H., LUHMANN, T., RAGUSE, K. (2005). Three-dimensional acquisition of high-dynamic processes with a single-camera system and stereo-beam splitting. In Grün, A., Kahmen, H. (Hrsg.), *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, Vol. II, Institut für Geodäsie und Geophysik, Technische Universität Wien, S. 175-184.
- HOYER, K., HOLZNER, M., GUALA, M., KINZELBACH, W. (2006). Simultaneous 3d-flow field and compliant wall measurements in a abdominal aortic aneurysm flow using Scanning-PTV. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 5*, Dresden, 4 Seiten (CD-ROM).
- IES (2006). *IES 4911 Synchronometer – System Description*. IES Ingenieurbüro für Elektronikentwicklung und Spezialgerätebau, Braunschweig, Revision 2006-08, 16 Seiten.
- IRANI, M., ANANDAN, P. (2000). About direct methods. In Triggs, B., Zisserman, A., Szeliski, R. (Hrsg.), *Vision Algorithms: Theory and Practice: International Workshop on Vision Algorithms 1999*, Corfu, Greece, Vol. 1883 of Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 267-277.
- ISO 8721 (1986). *Road vehicles – Measurement techniques in impact tests – Optical instrumentation*. ISO 8721, ISO - International Organization for Standardization, 3 Seiten.
- KAHLMANN, T., INGENSAND, H. (2005). Investigation of the 3d-range-imaging-camera SwissRangerTM. In Grün, A., Kahmen, H. (Hrsg.), *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, Vol. I, Institut für Geodäsie und Geophysik, Technische Universität Wien, S. 227-236.
- KUTHIRUMMAL, S., JAWAHAR, C.V., NARAYANAN, P.J. (2002). Frame alignment using multiview constraints. *Proceedings IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Rochester, New York, USA, Vol. 3, S. 357-360.
- KÖLLER, P., REHFELD, N., GERHARD, A. (1993). Automatische Auswertung der Filmbildsequenzen von Crashversuchen unter Einsatz der digitalen Bildverarbeitung. *Proceedings of MessComp1993: Messen und Verarbeiten elektrischer und nichtelektrischer Größen*, Wiesbaden, S. 85-91.
- LEE, L., ROMANO, R., STEIN, G. (2000). Monitoring activities from multiple video streams: establishing a common coordinate frame. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (T-PAMI)*, Vol. 22, No. 8, S. 758-767.
- LEI, C., YANG, Y.-H. (2005). *Line feature based multiple video synchronization*. Technical Report TR05-20, Department of Computing Science, University of Alberta, Edmonton, Canada, 8 Seiten.

- LITOS, G., ZABULIS, X., TRIANTAFYLIDIS, G. (2006). Synchronous image acquisition based on network synchronization. *Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop – 3D Cinematography (CVPRW)*, New York, New York, USA, 6 Seiten (CD-ROM).
- LUHMANN, T. (2003). *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 2. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg, 586 Seiten.
- LUHMANN, T. (2005a). Zum photogrammetrischen Einsatz von Einzelkameras mit optischer Stereostrahlteilung. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation (PFG)*, Heft 2/2005, S. 101-110.
- LUHMANN, T. (2005b). On the determination of object rotation and translation in 3-d space (6DOF) by a single camera. In Grün, A., Kahmen, H. (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, Vol. II, Institut für Geodäsie und Geophysik, Technische Universität Wien, S. 157-166.
- MAAS, H.-G. (1992): *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik*. Dissertation, Technische Wissenschaften ETH Zürich, Nr. 9665, Mitteilungen / Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 50, 142 Seiten.
- MAAS, H.-G., HENTSCHEL, B., SCHREIBER, F. (2003). An optical triangulation method for height measurements on water surfaces. In El Hakim, S.F., Grün, A., Walton, J.S. (Hrsg.), *Videometrics VIII – Electronic Imaging 2003*, Santa Clara, California, USA, SPIE Proceedings Series, Vol. 5013, S. 103-109.
- MAAS, H.-G. (2005). Werkzeuge und Anwendungen der photogrammetrischen 3D-Bewegungsanalyse. In Luhmann, T. (Hrsg.), *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005*, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 2-11.
- MAAS, H.-G., HAMPEL, U. (2006). Photogrammetric techniques in civil engineering material testing and structure monitoring. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS)*, Vol. 72, Nr. 1, S. 39-45.
- MAK (2006). *High-Speed-Display EFE 80*. MAK Bildtechnik GmbH, Wolfsburg, www.mak-bildtechnik.de, Zugriff: 14.01.2006.
- MCCLENATHAN, R.V., NAKHLA, S.S., MCCOY, R.W., CHOU, C.C. (2005). Use of photogrammetry in extracting 3d structural deformation/dummy occupant movement time history during vehicle crashes. *Proceedings SAE World Congress and Exhibition, Session: Safety Test Methodology and Structural Crashworthiness*, Detroit, Michigan, USA, SP-1937, S. 81-88.
- MULSOW, C., PUTZE, T., MAAS, H.-G., HENTSCHEL, B. (2005). Modellierung und Kalibrierung eines optischen Messsystems zur Bestimmung von bewegten Wasserspiegelmodellen. In Luhmann, T. (Hrsg.), *Photogrammetrie - Laserscanning - 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005*, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 30-37.
- NAC (2004). *NAC Hi-Dcam II - Specifications*. NAC Image Technology, USA, www.nacinc.com, Zugriff: 14.01.2004.
- NARAYANAN, P.J., RANDEP, P., KANADE, T. (1995). *Synchronous capture of image sequences from multiple cameras*. Technical Report CMU-RI-TR-95-25, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 11 Seiten.
- OGGIER, T., LEHMANN, M., KAUFMANN, R., SCHWEIZER, M., RICHTER, M., METZLER, P., LANG, G., LUSTERNBERGER, F., BLANC, N. (2004). An all-solid-state optical range camera for 3d real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (SwissRanger). In Mazuray, L., Rogers, P.J., Wartmann, R. (Hrsg.), *Optical Design and Engineering*, St. Etienne, France, Proceedings of SPIE, Vol. 5249, S. 534-545.
- PHILIPPENS, M. (2003). High speed video photogrammetry - seeing is believing. *TNO Automotive - By the Way*, S. 13-14.
- POLLEFEYS, M., VAN GOOL, L., VERGAUWEN, M., VERBIEST, F., CORNELIS, K., TOPS, J., KOCH, R. (2004). Visual modelling with a hand-held camera. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 59, Nr. 3, S. 207-232.
- POOLEY, D.W., BROOKS, M.J., VAN DEN HENGEL, A.J., CHOJNACKI, W. (2003). A voting scheme for estimating the synchrony of moving-camera video. *Proceedings IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Barcelona, Spain, Vol. 1, S. 413-416.
- PUTZE, T. (2004). Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen. In Seyfert, E. (Hrsg.), *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, Vol. 12, S. 325-332.
- PUTZE, T., HOYER, K. (2005). Modellierung und Kalibrierung eines virtuellen Vier-Kamerasystems auf Basis eines verstellbaren Spiegelsystems. In Luhmann, T. (Hrsg.), *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005*, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 164-171.

- RAGUSE, K., WIGGENHAGEN, M. (2003). Quality parameters of the optical data channel used in impact tests. In Grün, A., Kahmen, H. (Hrsg.), *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, Vol. II, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, S. 252-258.
- RAGUSE, K., DERPMANN-HAGENSTRÖM, P., KÖLLER, P. (2004). Verifizierung von Simulationsmodellen für Fahrzeugsicherheitsversuche. In Seyfert, E. (Hrsg.), *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, Vol. 12, S. 367-374.
- RAGUSE, K., LUHMANN, T. (2006): Einsatz der dynamischen Photogrammetrie bei Fußgängerschutzversuchen in der PKW-Entwicklung. In Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.), *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006*, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 10-17.
- RAO, C., GRITAI, A., SHAH, M., SYEDA-MAHMOOD, T. (2003). View-invariant alignment and matching of video sequences. *Proceedings 9th International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Nice, France, S. 939-946.
- REDLAKE (2004). *Motion Xtra HG Imager 2000*. Redlake Inc., USA, www.redlake.com, Zugriff: 14.01.2004.
- REMONDINO, F. (2002). Image sequence analysis for human body reconstruction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, Part 5*, Corfu, Greece, S. 363-368.
- REMONDINO, F. (2006). *Image-based modeling for object and human reconstruction*. Dissertation, Technische Wissenschaften ETH Zürich, Nr. 16562, Mitteilungen/Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 91, 174 Seiten.
- REULKE, R. (2006). Combination of distance data with high resolution images. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 5*, Dresden, 5 Seiten (CD-ROM).
- RIEDE, R., WENDT, A., LUHMANN, T. (2004). Synchrone Mehrbildphotogrammetrie zur Aufnahme statischer und dynamischer 3D-Objekte. In Luhmann, T. (Hrsg.), *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004*, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 124-131.
- SAE (1995). *Instrumentation for Impact Test – Part 2: Photographic Instrumentation*. SAE Standard J211/2, SAE - Society of Automotive Engineers, International.
- SAHRHAGE, V., RIEDE, R., LUHMANN, T. (2006). Optische 3D-Navigation von Sensoren. In Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.), *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006*, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 54-62.
- SANTEL, F. (2006). *Automatische Bestimmung von Wasseroberflächen in der Brandungszone aus Bildsequenzen mittels digitaler Bildzuordnung*. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover, Nr. 259, 63 Seiten.
- SCHMIDT, T., TYSON, J., GALANULIS, K., REVILOCK, D., MELIS, M. (2005). Full-field dynamic deformation and strain measurements using high-speed digital cameras. In Paisley, D.L., Kleinfelder, S., Snyder, D.R., Thompson, B.J. (Hrsg.), *26th International Congress on High-Speed Photography and Photonics*, Alexandria, Virginia, USA, Proceedings of SPIE, Vol. 5580, S. 174-185.
- SINHA, S.N., POLLEFEYS, M. (2004). Synchronization and calibration of camera networks from silhouettes. *Proceedings 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Cambridge, United Kingdom, Vol. 1, S. 116-119.
- SPENCER, L., SHAH, M. (2004). Temporal synchronization from camera motion. *Proceedings 6th Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, Jeju Island, Korea, Vol. 1, S. 515-520.
- STEIN, G.P. (1998). Tracking from multiple view points: self-calibration of space and time. In Lukes, G.E. (Hrsg.), *Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop*, Monterey, California, USA, Morgan Kaufmann, Vol. 2, S. 1037-1042.
- STREILEIN, T., HILLMANN, J. (2002). Stochastische Simulation und Optimierung am Beispiel VW Phaeton. *VDI-Tagung: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau*, Würzburg, 22 Seiten (CD-ROM).
- TORR, P.H.S., ZISSERMAN, A. (2000). Feature based methods for structure and motion estimation. In Triggs, B., Zisserman, A., Szeliski, R. (Hrsg.), *Vision Algorithms: Theory and Practice: International Workshop on Vision Algorithms 1999*, Corfu, Greece, Vol. 1883 of Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 278-294.
- TRESADERN, P., REID, I. (2003). Synchronizing image sequences of non-rigid objects. *Proceedings 14th British Machine Vision Conference (BMVC)*, Norwich, United Kingdom, British Machine Vision Association (BMVA), Vol. 2, S. 629-638.

-
- TRESADERN, P., REID, I. (2004). Uncalibrated und unsynchronized human motion capture: a stereo factorization approach. *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Washington, D.C., USA, Vol. 1, S. 128-134.
- TUYTELAARS, T., VAN GOOL, L. (2004). Synchronizing video sequences. *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Washington, D.C., USA, Vol. 1, S. 762-768.
- WEDGE, D., HUYNH, D., KOVESI, P. (2006). Motion guided video sequence synchronization. In Narayanan, P.J., Nayar, S.K., Shum, H.-Y. (Hrsg.), *Computer Vision – ACCV 2006: 7th Asian Conference on Computer Vision, Proceedings, Part II*, Hyderabad, India, Vol. 3852 of Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 832-841.
- WHITEHEAD, A., LAGANIERE, R., BOSE, P. (2005). Temporal synchronization of video sequences in theory and in practice. *Proceedings of 7th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision and IEEE Workshop on Motion and Video Computing*, Breckenridge, Colorado, USA, Vol. 2, S. 132-137.
- WILLNEFF, J. (2003). *A spatio-temporal matching algorithm for 3d particle tracking velocimetry*. Dissertation, Technische Wissenschaften ETH Zürich, Nr. 15276, Mitteilungen / Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 82, 123 Seiten.
- WOLF, L., ZOMET, A. (2002a). Correspondence-free synchronization and reconstruction in a non-rigid scene. In *Proceedings of Workshop on Vision and Modelling of Dynamic Scenes*, Copenhagen, Denmark, 4 Seiten (CD-ROM).
- WOLF, L., ZOMET, A. (2002b). Sequence-to-sequence self calibration. In Heyden, A., Sparr, G., Nielsen, M., Johansen, P. (Hrsg.), *Computer Vision – ECCV 2002: 7th European Conference on Computer Vision, Proceedings, Part II*, Copenhagen, Denmark, Vol. 2351 of Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 370-382.
- YAN, J., POLLEFEYS, M. (2004). Video synchronization via space-time interest point distribution. *Proceedings 6th Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS)*, Brussels, Belgium, 5 Seiten.
- ZHOU, C., TAO, H. (2003). Dynamic depth recovery from unsynchronized video streams. *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Madison, Wisconsin, USA, Vol. 2, S. 351-358.

Danke

- ... Prof. Dr. Christian Heipke für die Unterstützung während meiner Arbeit am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) und anschließend bei der Volkswagen AG sowie für die Zeit für Diskussionen, die stets neue Aspekte aufgeworfen haben und so wesentlich zur Verbesserung der Arbeit beigetragen haben.
- ... Prof. Dr. Hans-Gerd Maas und Prof. Dr. Hansjörg Kutterer für die Übernahme der Referate.
- ... Prof. Dr. Monika Sester für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.
- ... Hr. Bogenrieder (DaimlerChrysler AG), Hr. Gabler (BMW AG), Hr. Keul (Audi AG), Hr. Köller (Volkswagen AG) und Hr. Rentschler (Dr. h.c. F. Porsche AG) für die gute, freundliche und lehrreiche Zusammenarbeit im Forschungsprojekt „Crash“ am IPI, das gleichzeitig der Startschuss für meine Promotion war.
- ... Dr. Manfred Wiggenhagen, der immer und zu jeder Zeit ein offenes Ohr für Probleme hatte, nicht nur für fachliche, sowie für den Arbeitsplatz, den er mir wie selbstverständlich jeden Freitag in seinem Büro zur Verfügung gestellt hat.
- ... den IPI Mitarbeitern für die Unterstützung und die freundliche Arbeitsatmosphäre während meiner Zeit am Institut sowie für die freundliche Aufnahme an meinen späteren IPI-Freitagen.
- ... meinen Kollegen bei Volkswagen, besonders Peter Derpmann-Hagenström, Dr. Stefan Dauer, Peter Köller und Ole Vieth, die mich stets unterstützt haben und mir immer den Rücken frei gehalten haben um das Ziel Promotion zu erreichen.
- ... meinen Vorgesetzten bei Volkswagen, Hr. Gundel, Hr. Prang und Dr. Florian Weiser, die mir trotz der teilweise schwierigen Rahmenbedingungen die Möglichkeit gegeben haben, diese Arbeit fertig zu stellen.
- ... den Korrekturlesern, Dr. Markus Gerke, Dr. Folke Santel, Dr. Manfred Wiggenhagen, Dr. Bernd-Michael Wolf, die sich die Zeit genommen haben, diese Arbeit besser zu machen.
- ... allen Freunden, die es akzeptiert haben, dass ich einen Großteil der Wochenenden speziell im letzten Jahr am Schreibtisch verbracht habe.
- ... meinen Eltern, Großeltern und meiner Schwester für die Unterstützung und den Rückhalt während der gesamten Promotionszeit.
- ... Folke für Alles.
- ... Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.