

Dreidimensionale Bewegungserfassung mit Consumer-Highspeedkameras

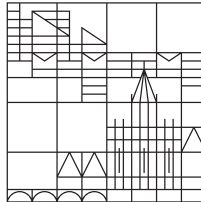
**Eine Systementwicklung
unter besonderer Berücksichtigung der Messunsicherheit**

**Dissertation zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktors der
Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)**

**vorgelegt von
Ralf Kredel**

an der

**Universität
Konstanz**



**Geisteswissenschaftliche Sektion
Fachbereich Geschichte und Soziologie
Fachgruppe Sportwissenschaft**

**Tag der mündlichen Prüfung: 26.07.2013
1. Referent: Prof. Dr. Hartmut Riehle
2. Referent: Prof. Dr. Wolfram Kutsch**

Just how much more closely the numbers can approach the "true values" depends on our knowledge of the truth. One approaches truth asymptotically, sometimes at the cost of great effort; nevertheless, it is necessary to examine the path toward this ultimate goal and select reasonable limits of achievement.

– Chester C. Slama, Editor of the Manual of Photogrammetry, 1980.

It is virtually impossible to get anything exactly right.

– Carl de Boor, University of Wisconsin.

Abstract

In this thesis, a motion capturing system based on consumer high-speed cameras is developed and tested. It is aimed to be used in the field of Sport Science, especially in capturing environments where commercial motion capturing systems are still not suited to fulfill all needs.

Using consumer hardware, however, gives rise to additional uncertainties in the measurement process. Therefore, special emphasis is placed on the analysis of measurement uncertainty originating from the imaging process, from the distinctive features of consumer camera hardware as well as from the used software methods for calibration, image measurement and reconstruction. After reviewing the state of the art of motion capturing systems, modeling and parameter identification methods for camera calibration are presented and discussed. In a further step, modeling methods are selected based on functional camera hardware tests before the necessary software and hardware elements besides camera calibration are discussed and chosen for implementation in the motion capturing system. Topics include automated video processing, marker tracking, correction of rolling shutter effects as well as the alignment of multiple unsynchronized video streams.

In the second part of the thesis the focus is directed to the simulation of effects of parameter inaccuracies on system uncertainty as well as to the testing and validation of the implemented system. Combining simulation studies and measurements on the real system while using different types of calibration methods, the usability of software and system is evaluated. As a result of the development, the reconstruction uncertainty of a typical system setup was reduced from static 11.86 mm reconstruction error with a reference frame calibration method to max. 4.126 mm ($M=0.073$ mm; $SD=1.486$ mm) with a moved reference point method. This method is based on the self calibration algorithm proposed by Svoboda, Martinec und Pajdla (2005), on correction software for the compensation of consumer camera inaccuracies and on an additional bundle adjustment step involving all reconstructed markers. A resultant advantage is the possibility to calibrate capturing volumes without the need of special reference frames reducing the reconstruction error at the same time by about factor 10.

As another result, the theoretical framework for error propagation from the initial estimates of reference and image points and their uncertainties to the final reconstructed marker trajectories is outlined. With the combination of the simulation environment, this will allow for the prediction of the achievable uncertainties of marker trajectories with the chosen system configuration and can therefore reduce the effort to set up a consumer camera based motion capturing system configuration.

Kurzfassung

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Entwicklung und der Test eines auf Consumer-Highspeedkameras basierenden Bewegungserfassungssystems. Consumer-Kameras sind flexibler einsetzbar als kommerzielle Bewegungserfassungssysteme, zugleich kostengünstiger und werden daher oft in der sportwissenschaftlichen Forschung verwendet. Durch ihren Einsatz entstehen jedoch prinzipbedingt höhere Messunsicherheiten, deren Bestimmung in der vorliegenden Arbeit ein besonderer Stellenwert eingeräumt wird.

Nach einem Überblick über aktuelle Bewegungserfassungssysteme und deren Genauigkeiten folgt eine Betrachtung der Messunsicherheit aus metrologischer Perspektive. Anschließend werden die Prozesse der Bildfassung bei digitalen Consumer-Kameras sowie die zur Modellierung des Kameraabbildungsverhaltens notwendigen Parameteridentifikationsmethoden dargestellt. Diese reichen vom häufig genutzten DLT-Verfahren über Methoden mit Verzeichnungskorrektur bis zu Bündelausgleichsverfahren. Im Anschluss werden die für die verwendeten Kameras geeigneten Methoden auf Basis funktionaler Hardwaretests ausgewählt und weitere für das Bewegungserfassungssystem notwendige Softwarekomponenten diskutiert. Dazu gehören neben der automatisierten Video- und Bildverarbeitung, spezielle Verfahren zur Korrektur von Consumer-Kamera-spezifischen Abweichungen, z. B. die Korrektur von Rolling-Shutter-Verzerrungen.

Im zweiten Teil der Arbeit richtet sich der Fokus auf die Simulation der Effekte von Parameterungenauigkeiten auf die Systemgenauigkeit sowie auf die Validierung und den Test des implementierten Systems. Dabei konnte die Rekonstruktionsgenauigkeit von 11.86 mm bei einer Referenzrahmenkalibration durch den Einsatz der Kalibrationsmethode mit Bündelausgleichsverfahren von Svoboda u. a. (2005) auf maximal 4.126 mm ($M=0.073$ mm; $SD=1.486$ mm) reduziert werden. Diese Methode erlaubt zudem eine einfachere Kalibration größerer Messvolumen ohne aufwändige Referenzrahmen und ist daher ideal für den sportwissenschaftlichen Einsatz geeignet.

Ein weiteres Ergebnis der Arbeit ist die theoretische Ableitung der Fehlerfortpflanzung für die Prozessschritte der Bewegungserfassung. In Kombination mit der entwickelten Simulationsumgebung wird damit die Grundlage für eine Prädiktion der erreichbaren Messunsicherheit bereits vor der eigentlichen Messung gelegt.

Danksagung

Mein Dank gebührt Professor Dr. Hartmut Riehle für die Annahme als Doktorand, die Freiheit bei der Themenwahl und die Unterstützung in jeglicher Hinsicht. Es war eine sehr angenehme Zeit auf „D6“ und man hatte das Gefühl, in einer Welt zu sein, in der die Uhren noch ein wenig langsamer ticken und einem dadurch etwas mehr Zeit zum Nachdenken lassen, als dies sonst üblich ist. Darüber hinaus möchte ich besonders Professor Dr. Wolfram Kutsch für die Zweitbetreuung eines eher ungewöhnlichen Themas für eine Dissertation aus der Sportwissenschaft sowie Professor Dr. Dr. Paul Schönle für die Tätigkeit als mündlicher Prüfer danken; Professor Dr. Ernst-Joachim Hossner für das Zurverfügungstellen des Sensomotoriklabors und die gewährten Schreibpausen, obwohl so viel Anderes im Aufbau befindlich war; der Mechanik- und Elektronikwerkstatt der Universität Konstanz für die Erfüllung auch ungewöhnlicher Wünsche, von denen einige final nicht einmal in die Arbeit eingingen; Gigi für die gemeinsame Zeit auf „D6“ mit Kaffee, Tee und Diskussionen; Hagen für das Korrekturlesen und die moralische Unterstützung.

Meinen Eltern, ohne die ich nicht wäre, wo ich jetzt bin, und die mir alle Zeit jegliche Unterstützung zukommen ließen und lassen. Ganz besonders meiner lieben Frau, Bettina, die in den letzten Jahren so viel von der ihr zustehenden Zeit und Aufmerksamkeit an diese Arbeit abtreten musste, mich trotzdem immer unterstützte und aufbaute und ohne die diese Arbeit nicht fertig geworden wäre. Und zum Schluss unserer kleinen Tochter, Kiana, die nicht nur auf den ein oder anderen Spielnachmittag und -abend verzichten musste, sondern für die es unbegreiflich war, warum sich Papa, wenn er schon zu Hause war, immer in diesem Zimmer einsperrte. Ich liebe Euch.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Problemstellung	1
2	Stand der Technik	7
2.1	Bewegungserfassung	7
2.2	Optische Bewegungserfassungssysteme	9
2.2.1	Passivmarker-Infrarot-Systeme	9
2.2.2	Passivmarker-Video-Systeme	10
2.2.3	Aktivmarker-Systeme	11
2.2.4	Markerlose Systeme	12
2.3	Anwendung in der Sportwissenschaft	14
2.4	Metrologische Perspektive	18
2.4.1	Der Begriff der Messunsicherheit	18
2.4.2	Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM	21
2.4.3	Messunsicherheit in der Bewegungserfassung	25
2.5	Forschungsfrage und Vorgehensweise	30
3	Modellierung von Consumer-Kameras	35
3.1	Kamerahardware	35
3.2	Kameramodellierung	44
3.2.1	Modellierung idealer Kameras	44
3.2.2	Modellierung realer Kameras	49
3.2.3	Modellierung digitaler Kameras	59
3.3	Parameteridentifikation	62
3.3.1	Direkte Lineartransformation (DLT)	63
3.3.2	DLT mit Verzeichnungskorrektur	65
3.3.3	Ausgleichsverfahren	66
3.3.4	Bündelblockausgleich in der Bewegungserfassung	72
3.3.5	Weitere iterative Verfahren	73
3.3.6	Dreidimensionale Positionsmessung	73
3.3.7	Unsicherheitsbetrachtung	76

3.4	Zusammenfassung	82
4	Systementwicklung	85
4.1	Die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1	86
4.1.1	Funktionsumfang	86
4.1.2	Testergebnisse DIWA-Labs	88
4.1.3	Test der Repositioniergenauigkeit	92
4.1.4	Test der Videobildrate	96
4.1.5	Test der Rolling-Shutter-Effekte	98
4.1.6	Zusammenfassung	102
4.2	Vom Video zur 3D-Trajektorie	103
4.2.1	Videodecodierung	103
4.2.2	Manuelle Koordinatenbestimmung	104
4.2.3	Automatische Koordinatenbestimmung	107
4.2.4	Tracking im Bildraum	115
4.2.5	Rolling-Shutter-Korrektur	119
4.2.6	Synchronisierung	119
4.2.7	Rekonstruktion	123
4.2.8	Zusammenfassung	125
4.3	Implementierung und Test	126
4.4	Messunsicherheitsbestimmung	132
5	Ergebnisse	145
5.1	Ergebnisse der Simulationen	145
5.2	Ergebnisse der realen Datensätze	156
5.2.1	Referenzrahmenkalibration	156
5.2.2	Dynamische Kalibration	158
5.2.3	Auswertung Markercluster	168
5.3	Ergebnisse der Validierungsmessung	170
5.4	Zusammenfassung	173
6	Schlussbetrachtungen	175
6.1	Zusammenfassung	175
6.2	Diskussion	180
6.3	Ausblick	182
	Literatur	185
	Tabellenverzeichnis	197
	Abbildungsverzeichnis	200

A	Anhang	209
A.1	Lösung der Unsicherheitsfortpflanzung impliziter Messmodelle . . .	209
A.2	Partielle Ableitungen der DLT-Gleichungen	210
A.3	Partielle Ableitungen der Kollinearitätsgleichungen	213
A.4	Partielle Ableitungen der Rolling-Shutter-Korrekturen	215
A.5	Parametereinstellungen der dynamischen Kalibration	216
A.6	Testergebnisse DIWA Labs	217
A.7	Funktionsübersicht DigitizeMe	221

Einführung und Problemstellung

Das Interesse am Verständnis menschlicher Bewegung ist wohl so alt wie die Menschheit selbst. Die systematische Aufzeichnung und Analyse von Bewegungsabläufen begann jedoch erst 1872 mit Muybridges Idee, mehrere Kameras nebeneinander aufzustellen und sequentiell auszulösen. So photographierte er unter anderem die bekannten Bilder des Pferdegalopps, mit denen er die Existenz einer Flugphase nachweisen konnte, während der kein Huf des Pferdes den Boden berührte (Abb. 1.1).

Der französische Physiologe Marey entwickelte kurz darauf den Chronophographen, eine gewehrartige Kamera, die mehrere Bilder schnell hintereinander aufnehmen konnte und als der Vorläufer der modernen Filmkamera bezeichnet werden kann. Diese Methode und deren Weiterentwicklung – Marey baute bereits 1894 die erste Hochgeschwindigkeitskamera mit 700 Bildern pro Sekunde – machten Muybridge und Marey zu den Mitbegründern der modernen Bewegungswissenschaft und führten zu vielen Veröffentlichungen über die Biomechanik menschlicher Fortbewegung (Wing & Beek, 2004). Marey beispielsweise kennzeichnete die Achsen der Körpersegmente durch weiße Linien, während der restliche Körper und der Hintergrund der Aufnahme schwarz waren. Dadurch konnte er die zyklische Abfolge der Gangbewegung des Menschen durch ein Strichmodell darstellen, eine Methode, die noch heute zur Visualisierung von Bewegungsmustern eingesetzt wird (vgl. Abb. 1.2).

Mit Hilfe der Methoden der analytischen Photogrammetrie konnten aus der mit Bildern erfassten Bewegung quantitative Bewegungsdaten gewonnen werden, die zur weiteren Analyse auf der Suche nach mathematischen und physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Bewegung zur Verfügung standen.



Abb. 1.1: Nachweis der Flugphase (Teilbild 2 und 3) im Pferdegalopp durch Sequenzaufnahmen (Muybridge, 1878, <http://www.fen-net.de/walter.preiss/bilder/muybridge.jpg>).

1. EINFÜHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG

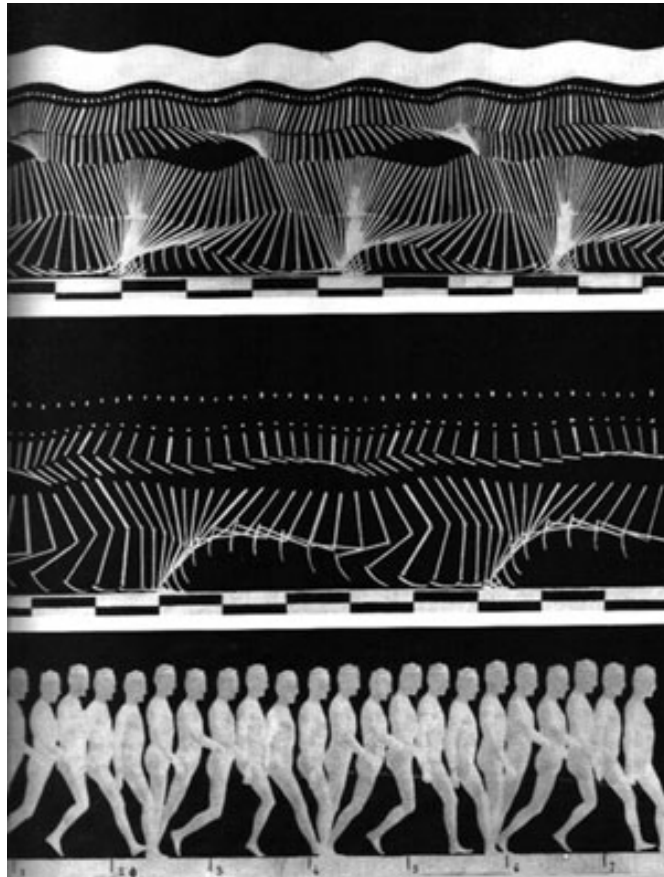


Abb. 1.2: Mareys chronophotographische Studien zur Bewegung des Menschen (Etienne-Jules Marey, *Étude chronophotographique de la locomotion humaine*, 1886, <http://www.understandingduchamp.com/author/marey/index.html>)

In einem nächsten Entwicklungsschritt wurden die bis dahin zweidimensionalen Messungen durch die Kombination mehrerer Kameras, die zeitgleich aus unterschiedlichen Perspektiven Bilder der Szene aufnahmen, zu dreidimensionalen Messungen erweitert. Mit diesen Methoden war nun eine komplette Rekonstruktion des dreidimensionalen Bewegungsverlaufs und damit eine weiterführende mathematisch-physikalische Modellierung des Bewegungsverhaltens des Menschen möglich.

Vor allem mit dem Einzug der Digitaltechnik und der Entwicklung digitaler Bildsensoren und leistungsfähigerer Computer fand diese Methode der optischen Bewegungserfassung immer weitere Verbreitung, da viele der zuvor manuell durchzuführenden Arbeitsschritte (bspw. das Digitalisieren der Markerdaten) durch die Verwendung von speziellen Markern, Lichtquellen und Bildverarbeitungsalgorithmen automatisiert werden konnten. Diese nichtinvasive Metho-

de wird seitdem in den unterschiedlichsten Bereichen, z. B. bei der medizinischen Ganganalyse, der Analyse und Optimierung von Bewegungsabläufen in der Sportwissenschaft sowie in der Unterhaltungsindustrie angewendet (Maas, 2005).

Ziel aller dieser Systeme ist die mathematische Beschreibung der aufgezeichneten Bewegung durch Translation und Rotation der verschiedenen Körpersegmente oder anhand der daraus resultierenden Gelenkwinkel. Aus den Bewegungsdaten können mit zusätzlich erhobenen anthropometrischen Daten mathematisch-physikalische Körpermodelle entwickelt werden. Mit diesen erfolgt eine Analyse von Körperschwerpunkten, von Bewegungen einzelner Körpersegmente oder -gelenke, Kraftverhältnissen und Reaktionskräften (Bonnetoy, Pradon & Chèze, 2005), sowie die Betrachtung von Energie und Leistung in den einzelnen Gelenken (Cappozzo, della Croce, Leardini & Chiari, 2005). Solche Daten können beispielsweise helfen, Bewegungen zu optimieren oder Fragen der muskulären Kontrolle zu beantworten.

Nicht nur durch die Art der mathematischen Modellierung, sondern bereits durch die Auswahl der aufzuzeichnenden Marker wird die reale Bewegung abstrahiert und ein Modell gebildet. Eine Grundanforderung an die Modellbildung ist die Kenntnis der durch die Reduktion und Abstraktion vom Original entstehenden Ungenauigkeiten (Thacker u. a., 2004), da schon die damit einhergehende Datenreduktion die Gültigkeit des modellierten Verhaltens und dementsprechend die Aussagekraft des Modells beeinflusst. Daher ist auch im Fall der wissenschaftlichen Anwendung der Bewegungserfassung die Kenntnis dieser Einflussfaktoren (die Ungenauigkeit durch die Modellreduktion und die Messungenauigkeit des Erfassungssystems) notwendig.

Die Ungenauigkeit durch die (Körper-)Modellreduktion ist kaum analytisch ermittelbar, solange die Bewegung des Skelettsystems durch Marker auf der Hautoberfläche erfasst wird. Es müsste eine vollständige Modellierung der Bewegungen der Weichteile im Vergleich zum Knochen erfolgen oder während identischer Bewegungen Vergleichsdaten – die reale Bewegung des Knochensegments – zu den erfassten Markerdaten erhoben werden. Dies wäre nur durch fest mit dem Knochen verbundene Marker möglich, die aufgrund der Invasivität der Befestigung selbst die Bewegung beeinflussen würden, oder durch zeitlich hochauflösende, bildgebende Verfahren, die jedoch die Position des Skelettsystems meist nur zweidimensional abbilden können. Bis auf bei spezifischen, meist stark eingeschränkten Bewegungen - bspw. im klinischen Umfeld - bleibt hier nur die Möglichkeit der Fehlerminimierung durch eine gewissenhafte Auswahl von Optimierungsmethoden (Ehrig u. a., 2011).

Die Messungenauigkeit des Erfassungssystems jedoch, also die Genauigkeit, mit der die Marker erfasst werden können, kann ermittelt werden. Dennoch wird eine detaillierte Betrachtung der Messungenauigkeiten von Bewegungser-

fassungssystemen bei der Anwendung in Sport- und Bewegungswissenschaft kaum durchgeführt. Ein Grund mag die von Herstellerseite fast unmögliche Angabe eines spezifischen Messfehlers für ein System sein, da dieser stark von den Aufnahmebedingungen abhängt und daher entweder einer komplexen Modellierung aller Umgebungseinflüsse bedarf oder spezifisch für jedes neue Systemsetup vom Anwender erfasst werden müsste (Cappozzo u. a., 2005). Dieser jedoch, oft nicht mit den Feinheiten und kritischen Einflussgrößen des Systems vertraut, fühlt sich mit der Anschaffung eines kommerziellen Systems auf der sicheren Seite, was bei Verwendung der meisten kommerziell erhältlichen Systeme aufgrund der hohen Rekonstruktionsgenauigkeiten im Submillimeterbereich auch zutrifft. Der Einfluss dieses Fehlers ist im Vergleich zu anderen bei der menschlichen Bewegungserfassung auftretenden Messfehler – beispielsweise der Verschiebung der auf der Hautoberfläche angebrachten Marker relativ zu den Knochen des Segmentes um bis zu 40 mm (Cappozzo u. a., 2005) – zu gering für eine relevante Beeinflussung des Messergebnisses.

Einige Messaufgaben in der Sport- und Bewegungswissenschaft sind jedoch mit den oben genannten Systemen nicht durchführbar. Vor allem die flexible Anwendbarkeit im Freien, beispielsweise bei der Analyse von Leichtathleten, ist aufgrund der Bauweise der Systeme (verkabelte Infrarotkameras) oft unmöglich. Daher werden in einigen Bereichen einfache Consumer-Kameras in Verbindung mit kommerzieller oder eigenentwickelter Software verwendet, welche eine dreidimensionale Rekonstruktion der Bewegung aus den erfassten Videodaten erlaubt. Unter anderem aufgrund der Unabhängigkeit der Software vom verwendeten Kamerasystem und der daraus resultierenden Nichtberücksichtigung spezifischer Kameraeigenschaften ist jedoch keine vollständige Abschätzung von Messgenauigkeiten möglich. Mit der oben genannten Anforderung an die Modellbildung sind diese Consumer-Kamera-Messsysteme daher streng genommen für den wissenschaftlichen Einsatz ohne anwendungsspezifische Validierung nicht nutzbar, vor allem da teilweise die entstehenden Messungenauigkeiten wesentlich größer einzuschätzen sind als bei kommerziell erhältlichen Systemen. Eigene Erfahrungen mit einem solchen System in der Fachgruppe Sportwissenschaft der Universität Konstanz, das Consumer-Kameras in Verbindung mit kommerzieller Analysesoftware nutzt, bestätigen die Annahme der nicht bestimmbaren Messgenauigkeit. Mangels Alternativen werden diese Systeme häufig trotzdem verwendet, oft die dabei entstehende Messungenauigkeit nicht weiter betrachtend. Dieser unbefriedigende Umstand weckte den Wunsch, den diesen Systemen zugrundeliegenden Messprozess und Möglichkeiten zur Messgenauigkeitsabschätzung zu verstehen, um mit den in Konstanz vorhandenen Kameras ein System zu entwickeln, das die messtechnischen Anforderungen erfüllt, den manuellen Auswerteaufwand reduziert und somit besser für den wissenschaftlichen Einsatz geeignet ist als das vorhandene System.

Die vorliegende Arbeit dokumentiert diesen Entwicklungsprozess. Dazu wird in Kapitel 2 der Stand der Technik im Bezug auf die Erfassung menschlicher Bewegung, im Speziellen mit optischen Erfassungssystemen beschrieben, bevor die Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen der oben genannten, für die sport- und bewegungswissenschaftliche Feldforschung typischen Systeme vor allem unter dem Aspekt der Messunsicherheit kritisch betrachtet werden. Auf Basis dieser Ausarbeitung wird die generelle Herangehensweise an die Systementwicklung definiert, in Abschnitt 2.5 die konkrete Forschungsfrage formuliert und die weitere Vorgehensweise zur Systementwicklung detailliert. Kapitel 3 beschreibt die relevanten Grundlagen der Photo- und Videogrammetrie vor allem im Bezug auf die Modellierung von Consumer-Kameras. In Kapitel 4 werden die über die Kameramodellierung hinaus notwendigen Systembestandteile eines Bewegungserfassungssystems behandelt. Dabei stehen speziell die für das vorliegende System entwickelten Methoden im Vordergrund. Darüber hinaus werden die durchgeführten Simulationen sowie die Hardware-, Software- und Systemtests für das Konstanzer Bewegungserfassungssystem beschrieben, bevor die theoretische Messunsicherheitsbetrachtung der implementierten Varianten erfolgt. In Kapitel 5 werden die gewonnenen Ergebnisse der Simulationen und Tests berichtet und zusammengefasst. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung und Diskussion der gesamten Arbeit sowie eine Darstellung der Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Systemkonzepts (Kapitel 6).

Stand der Technik

2.1 Bewegungserfassung

Das Ziel der Bewegungserfassung ist es, reale Bewegungen mathematisch-physikalisch zu beschreiben, um eine Weiterbearbeitung der Bewegungsdaten für unterschiedliche Bereiche zu ermöglichen. Eine bekannte Anwendung der Bewegungserfassung (engl. *Motion Capture*) ist die zeitsparende und realitätsnahe Animation von Filmcharakteren. Ursprünglich prägten jedoch Medizin, Biomechanik und Bewegungswissenschaft die Erfassung, Charakterisierung und Analyse von menschlichen und tierischen Bewegungsabläufen (vgl. Abschnitt 1). Die Quantifizierung der Bewegung erlaubt beispielsweise den Vergleich von Bewegungsdaten vor und nach medizinischen oder sportwissenschaftlichen Interventionen und ist somit ein geeignetes Mittel, um deren Effektivität zu überprüfen (vgl. Mitchell, 1995). Weiterführend können durch die zusätzliche Erfassung von Größen- und Masseneigenschaften von Körpersegmenten (den anthropometrischen Merkmalen) dynamische Modelle des menschlichen Körpers erstellt werden. Mit diesen können zum einen nicht *in-vivo* messbare Parameter, wie Arbeit, Energie, Leistung in den einzelnen Gelenken und Segmenten, (Cappozzo u. a., 2005), berechnet werden, die wiederum Rückschlüsse auf Ansteuerungs- und Regelmechanismen ermöglichen. Zum anderen können anhand dieser Modelle Variationen der Bewegung und ihre Auswirkung auf verschiedene Leistungsparameter simuliert werden (vgl. Bonnefoy u. a., 2005; Vieten, 2004). So kann durch die Bewegungsanalyse die im Sinne der mechanisch-physikalischen Parameter optimale Bewegung bestimmt werden, die anschließend im Rahmen spezifischer Interventionen gelernt und auf ihre Effektivität getestet werden kann.

Die Anforderungen an die mathematisch-physikalischen Beschreibungen unterscheiden sich je nach Anwendungsgebiet. Interessieren bei der Animation der Filmcharaktere nur die äußeren Merkmale der Bewegung, also die Position der einzelnen Körpersegmente über den Zeitverlauf, sind in Medizin oder Bewegungsanalyse oft die räumliche Position und Orientierung der einzelnen Knochen relevant. Ist deren Stellung zueinander bekannt, können bei bekannten oder ap-

proximierten Insertionspunkten der wirkenden Muskeln Rückschlüsse auf relative Kraftverhältnisse und auf die Ansteuerungsmechanismen gezogen werden. Die Schätzung der Knochenstellung anhand der Stellung des Körpersegments an der Hautoberfläche schränkt jedoch die Aussagefähigkeit der (nichtinvasiven) Bewegungserfassung ein. Auswirkungen dieser Einschränkung auf die Interpretierbarkeit der erfassten Daten werden vielfach diskutiert (Leardini, Chiari, della Croce & Cappozzo, 2005; Mündermann, Corazza & Andriacchi, 2006; Peters, Galna, Sangeux, Morris & Baker, 2010). Daher wird versucht, mit Optimierungsmethoden die Lokalisierungsgenauigkeit der Knochen durch Oberflächenmarker zu steigern (Duprey, Cheze & Dumas, 2010; Stagni, Fantozzi, Cappello & Leardini, 2005). Da diese Einschränkung unabhängig vom Bewegungserfassungssystem besteht und in der vorliegenden Arbeit schwerpunktmäßig die Messunsicherheit des Erfassungssystems betrachtet werden soll, wird diese Thematik jedoch im Folgenden nicht weiter behandelt.

Zur Klassifizierung von Bewegungserfassungssystemen wird zwischen *Inside-in*-, *Inside-out*- und *Outside-in*-Systemen auf Basis der Position von Sensor (*Inside/Outside*) und Messgröße (*out/in*) unterschieden (Menache, 2000). Typische *Inside-in*-Systeme, bei denen sich sowohl die Sensoren als auch die Messgröße am Körper befinden, sind beispielsweise elektromechanische Goniometer, die direkt die Gelenkwinkel messen. Auch inertiale Messsysteme, die mit Beschleunigungssensoren und Gyroskopen die Bewegung von Körpersegmenten bestimmen, können zur Kategorie der *Inside-in*-Systeme gezählt werden. Bei *Inside-out*-Systemen nehmen die am Körper angebrachten Sensoren Informationen aus der Umgebung auf. Beispiele sind magnetosensitive Sensoren, die sich durch ein extern erzeugtes elektromagnetisches Feld bewegen und anhand der Veränderung der Feldlinienorientierung die eigene Position und Orientierung bestimmen können. Weitere *Inside-out*-Systeme sind am Körper befestigte, licht-sensitive Sensoren (Raskar u. a., 2007), die anhand äußerer, codierter Lichtquellen ihre Position registrieren oder an Körperteilen angebrachte Kameras, die durch Tracking der aufgezeichneten Umweltbewegung die Orientierung des Körpersegmentes bestimmen (Shiratori, Park, Sigal, Sheikh & Hodgins, 2011). *Outside-In*-Systeme sind Systeme, bei denen nicht am Körper befestigte Sensoren, beispielsweise Kameras, die Bewegung der Körpersegmente aufzeichnen. Diese häufig eingesetzten Systeme können weiter in infrarot- und videobasierte Passivmarkersysteme, Aktivmarkersysteme sowie markerlose Systeme unterschieden werden. Die Funktionsweise und Eigenschaften dieser Systeme werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

2.2 Optische Bewegungserfassungssysteme

2.2.1 Passivmarker-Infrarot-Systeme

Optische Passivmarkersysteme erfassen meist mittels Hochgeschwindigkeitskameras die Position von Markern, die z. B. am Körper des Versuchsteilnehmers angebracht sind. Die Systeme der Firmen Motion Analysis¹, Qualisys² oder VICON³ verwenden dazu retroreflektierende Marker, die von parallel zur Kameraausrichtung angebrachten Leuchtdioden-Ringen beleuchtet werden und das aus von diesen emittierte Licht auf den Bildsensor der Kameras reflektieren.

Durch eine vorherige Kalibration des Systems kann bei zeitsynchroner Bildfassung der einzelnen Kameras aus den Abbildungen der Marker die dreidimensionale Position des Markers rekonstruiert werden. Die typische Aufnahmefrequenz dieser Systeme liegt im Bereich von 500 Hz, kann jedoch bei Einschränkung der Kamerasichtfelder (dem *Field-of-view*, FoV) auf bis zu 2000 Hz erhöht werden. Durch die Verwendung von Infrarotlicht ist der Einsatzbereich dieser Systeme auf eine gut kontrollierte, oft abgedunkelte Umgebung limitiert. Des Weiteren werden die Systeme durch den Einsatz verschiedener Optiken mit fester Brennweite exakt auf das gewünschte Messvolumen angepasst und sind somit nur durch den Austausch von Systemkomponenten für unterschiedliche Einsatzgebiete anwendbar. Dies ist ein Grund, weshalb diese Systeme meist fix in Laboren installiert werden. Eine Ausnahme beschreiben Begon, Colloud, Fohanno, Bahaud und Monnet (2009) mit einem auf einem rollbaren Gerüst befestigten 8-Kamera-VICON-T40 System, das mit der zu erfassenden Person mit geschoben wird und dadurch Bewegungen von bis zu 40 m Ausdehnung mit einer Genauigkeit von 2 mm aufzeichnen kann. Die relative Anordnung der Kameras zueinander ist jedoch auch in dieser Anwendung fest und für das jeweilige Messvolumen ausgelegt. Die Firma Motion Analysis hat mittlerweile mit drahtloser Kommunikation zwischen Kameras und Aufzeichnungsgerät und der Entwicklung der Active-Filtering Technologie⁴ die Anwendungsmöglichkeiten ihrer Systeme im Außenbereich stark verbessert.

¹Firmenwebseite: <http://www.motionanalysis.com>

²Firmenwebseite: <http://www.qualisys.com>

³Firmenwebseite: <http://www.vicon.com>

⁴Dabei wird vor jedem Frame ein Bild aufgenommen, das eine Unterscheidung von Hintergrund und Markern ermöglicht und somit unempfindlich gegenüber dynamischen Änderungen von Lichtverhältnissen ist.



Abb. 2.1: Weinberger Speedcam 500 Highspeed-Kamerasystem der Universität Konstanz (<http://www.weinberger-service.com/d/speedcam.html>)

2.2.2 Passivmarker-Video-Systeme

Im Gegensatz zu den infrarotbasierten Bewegungserfassungssystemen sind die videobasierten Systeme hauptsächlich Softwarelösungen, die auf Standardhardware aus der industriellen Bildverarbeitung (*Machine Vision*) zurückgreifen. Typischerweise werden für die videobasierten Systeme CCD⁵-Kameras verwendet, die Bilder mit einer Frequenz von 50-60 Hz aufzeichnen können. Bei hohen Anforderungen an die zeitliche Auflösung werden Kameras mit einer Bildrate von bis zu 1000 Hz eingesetzt (vgl. z.B. Holzreiter, Kastner & Wagner, 1993). Diese Kameras haben keinen eigenen Massenspeicher, sondern übertragen den Bildstrom an einen PC, der die erfassten Daten digitalisiert, komprimiert und auf Festplatten speichert. Dadurch kann das Videomaterial meist bereits während der Aufnahme am Kontrollrechner betrachtet werden. Das in Abbildung 2.1 dargestellte Highspeed-Kamerasystem der Universität Konstanz ist ein typisches – wenn auch schon älteres – solches System. Durch die externe Triggerung der Datenaufnahme ist eine synchrone Erfassung der Bilder über mehrere Kameras hinweg möglich. Die Notwendigkeit eines separaten Kontrollrechners und der vor allem bei höheren Aufnahme Frequenzen nötigen Zusatzbeleuchtung des Aufnahmevolumens begrenzen allerdings auch hier die Portabilität und flexible Anwendbarkeit.

⁵CCD: Charge Coupled Devices, eine Halbleitertechnik

Neben den Programmen APAS der Firma Ariel Dynamics⁶, Winanalyse der Firma Mikromak Service⁷, Motion der Firma SIMI⁸ sind Contemplas⁹ und Dartfish¹⁰ bekannte Softwarehersteller bzw. Systemlieferanten für die medizinische und sportwissenschaftliche Bewegungserfassung. Die meisten dieser Softwarehersteller sind auf zweidimensionale Analysen im Bereich der Haltungs- und Ganganalyse bzw. für die Trainingspraxis spezialisiert. Typische Analysemethoden sind neben der teilweise halbautomatischen Verfolgung von Farbmarkern beispielsweise die Bestimmung von zweidimensionalen Winkel- oder Positionsverläufen in separaten, oft den Körperebenen identischen Ebenen. Somit sind diese Systeme nicht mit dem Anwendungsgebiet der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen optischen Bewegungserfassungssysteme vergleichbar. Alle Softwarelösungen außer derjenigen der Firma Dartfish bieten jedoch mittlerweile die Möglichkeit, Aufnahmen mehrerer Kameras gleichzeitig zu erfassen, diese zu kalibrieren und somit dreidimensional Bewegungen zu rekonstruieren.

2.2.3 Aktivmarker-Systeme

Im Unterschied zu den passiven optischen Bewegungserfassungssystemen besitzen die Marker der aktiven Systeme Leuchtelemente, die eine eigene Energieversorgung benötigen. Die kommerziell erhältlichen Systeme der Firmen Optotrak¹¹, Codamotion¹² oder Lukotronic¹³ verwenden Infrarot-LEDs als Marker (vgl. Abb. 2.2), die meist drahtlos angesteuert werden können und von infrarotsensitiven Kamerasystemen erfasst werden. Aufgrund des hohen Infrarotanteils im Sonnenlicht ist – wie schon bei den passiven Infrarotsystemen – der Anwendungsbereich hauptsächlich auf kontrollierte Laborbedingungen eingeschränkt.

Der Hauptunterschied zu den passiven Systemen liegt in der zeitmodulierten Ansteuerung der einzelnen Marker, die eine eindeutige Zuordnung der Marker ohne spätere Nachbearbeitung ermöglicht, da zu jedem Zeitpunkt der Erfassung nur ein Marker aktiv ist. Diese robuste Erkennung macht diese Systeme besonders für Anwendungen mit Echtzeitanforderungen (z. B. als Computereingabegerät) oder für die Routinearbeit im Rahmen klinischer Ganganalysen attraktiv. Aus der zeitmodulierten Ansteuerung resultiert jedoch eine Abhängigkeit der maxima-

⁶Firmenwebseite: <http://www.arielnet.com>

⁷Firmenwebseite: <http://www.mikromak.com>

⁸Firmenwebseite: <http://www.simi.com>

⁹Firmenwebseite: <http://www.contemplas.de>

¹⁰Firmenwebseite: <http://www.dartfish.com>

¹¹Firmenwebseite: <http://www.ndigital.com/lifesciences>

¹²Firmenwebseite: <http://www.codamotion.com>

¹³Firmenwebseite: <http://www.lukotronic.com>

2. STAND DER TECHNIK



Abb. 2.2: Aktive Infrarotmarker des Lukotronic-Systems der Universität Konstanz zur Bewegungserfassung der Phalange beim Klavierspiel (Riehle, 2009)

len Erfassungsfrequenz von der Anzahl der zu erfassenden Marker. Optotrak gibt beispielsweise eine Erfassungsfrequenz von $4600 \text{ Hz}/(n+1.3)$ an (n entspricht der Anzahl der zu erfassenden Marker¹⁴). Ein Ganzkörper-Markermodell mit 30 Markern ist dementsprechend maximal mit 146 Hz erfassbar, was für schnelle Bewegungen, z. B. im sportlichen Kontext, zu gering sein kann. Des Weiteren schränkt die umfangreiche Verkabelung zur Ansteuerung und Energieversorgung der einzelnen Marker die Anwendbarkeit besonders bei dynamischen Bewegungen ein (vgl. Abb. 2.2).

2.2.4 Markerlose Systeme

Markerlose optische Bewegungserfassungssysteme rekonstruieren Bewegungen anhand der in den aufgenommenen Bildern vorhandenen Merkmale, z. B. auf Basis der Konturen des jeweiligen Körpersegments. Dadurch sind sie robuster gegenüber Fehlern durch Markerbewegungen relativ zum passiven Bewegungsapparat (Mündermann u. a., 2006). Bereits Grün (1997) forderte, dass neue *videogrammetrische* Systeme zur Bewegungserfassung diese Funktionalität beinhalten sollen. Des Weiteren können diese Systeme wirklichkeitsgetreue dreidimensionale Volumenmodelle mit natürlicher Farbgebung durch die Übernahme der Textur aus den aufgenommenen Bildern erzeugen und bieten dadurch neue Analysemöglichkeiten, z. B. durch Finite-Elemente-Analysen des gesamten Volumenmodells. Die Algorithmen zur Extraktion der aufzuzeichnenden Person und deren Körpersegmente aus dem Kamerabild, die Verfolgung der Konturen und Rekonstruktion der dreidimensionalen Strukturen sind jedoch im Vergleich zu den oben genannten markerbasierten Systemen wesentlich komplexer, feh-

¹⁴<http://www.ndigital.com/lifesciences/certus-techspecs.php> [02.09.2010]

2.2. Optische Bewegungserfassungssysteme

leranfälliger und auch für den Einsatz in Echtzeitapplikationen, bei denen die Rekonstruktion innerhalb eines festgelegten Zeitintervalls erfolgen muss – vor allem beim Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras – nur eingeschränkt geeignet (vgl. Zelman u. a., 2009).

Trotzdem beschreiben Sigal und Black (2010) die markerlose Bewegungserfassung als gelöstes Problem, falls mehr als zehn kalibrierte Kameras vorhanden sind, die zu erfassenden Personen enge Kleidung tragen und sich die Umgebung (der Bildhintergrund) nicht verändert. Aktuell bieten die Firmen Organic Motion Biostage¹⁵ und im Low-Cost-Bereich IPI-Soft¹⁶ Systeme zur markerlosen Erfassung an. Die Vorteile dieser Variante der Bewegungserfassung liegen auf der Hand, so dass weltweit aktiv geforscht wird, um diese Systeme robuster und anwendungsfreundlicher zu gestalten. Die vollständige Alltagstauglichkeit dieser Systeme wäre nicht nur für die Bewegungserfassung im Rahmen der Sport- und Bewegungswissenschaft, sondern auch für Überwachungssysteme oder multimediale Systeme (z. B. 3D-Videokonferenzsysteme mit perspektivisch korrekten Projektionen der Konferenzteilnehmer, vgl. Weik, Wingbermühle und Niem, 2000) ein Schritt in eine neue Dimension der Bewegungserfassung.

¹⁵Firmenwebseite: <http://www.organicmotion.com/solutions/biostage>

¹⁶Firmenwebseite: <http://www.ipisoft.com>

2.3 Anwendung in der Sportwissenschaft

Auch für die sport- und bewegungswissenschaftliche Laborforschung sind die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Systeme gut geeignet. Die Laborräume bieten eine kontrollierte Umgebung für eine optimale Funktion dieser Systeme. Einige Fragestellungen können jedoch aufgrund der höheren externen Validitätsbedingungen nur in sportartspezifischen Umgebungen beantwortet werden, in denen die genannten Systeme nicht oder nur eingeschränkt nutzbar sind. Eine Bewegungserfassung z. B. beim Skifahren oder unter Wasser beim Schwimmen ist mit den oben beschriebenen Systemen im Allgemeinen nicht oder nur unter großem Zusatzaufwand möglich. Die notwendige Verkabelung der Kameras untereinander, die Anfälligkeit infrarotbasierter Systeme gegenüber Sonnenlicht und reflektierender Umgebung oder die fehlende Wasserdichtigkeit der Systeme sind beispielhafte Hinderungsgründe. Zwar entwickeln die Systemhersteller immer neue Lösungen, um auch diese Anwendungsbereiche abzudecken¹⁷, jedoch sind diese mit erheblichen Anschaffungskosten verbunden, da meist speziell für die jeweiligen Anforderungen entwickelte Hardware gekauft werden muss.

In der Sport- und Bewegungswissenschaft werden jedoch – außer in der spitzensportlichen Athletenbetreuung – nicht nur Schwimmen oder Skifahren untersucht, sondern die für die jeweils zugrundeliegende Fragestellung des Forschungsprojektes geeigneten Paradigmen aus der Vielzahl der sportlichen Disziplinen ausgewählt. Daher können Bewegungserfassungen in unterschiedlichsten Sportarten und Umgebungsbedingungen direkt aufeinanderfolgen, um verschiedene Aspekte in Bezug auf die gleiche Fragestellung zu beantworten. Die zur Bewegungserfassung eingesetzten Systeme müssen daher möglichst flexibel auf die unterschiedlichen Einsatzgebiete anzupassen sein. Unter anderem aus diesem Grund werden in der sportwissenschaftlichen Feldforschung oft handelsübliche Videokameras in Verbindung mit eigenentwickelter oder zugekaufter Software zur Bewegungserfassung eingesetzt. Die Systeme funktionieren ähnlich wie die in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Passivmarker-Video-Systeme, jedoch können die verwendeten Consumer-Kameras¹⁸ das Bildmaterial direkt auf internen Festplatten oder Speicherkarten aufzeichnen. Daher benötigen sie keinen zentralen Rechner und keine aufwendige Verkabelung. Zusätzlich erlauben sie durch integrierte Zoomobjektive eine flexible Anpassung des Bildausschnitts. Für Unterwasseraufnahmen können passende Unterwassergehäuse oder direkt was-

¹⁷Beispiele sind Motion Analysis Oqus Underwater für das 3D-Markertracking unter Wasser oder die Active Filtering Technologie für die Anwendung des Infrarotsystems im Außenbereich (vgl. Abschnitt 2.2.1).

¹⁸auch im weiteren Text wird das eingedeutschte Wort „Consumer-Kamera“ für handelsübliche „Verbraucher“ bzw. „Amateur“-Videokameras im Gegensatz zu professionellen Kameras verwendet.



Abb. 2.3: Passive, retroreflektierende Marker an den zu erfassenden Körperpunkten

serdichte Kameras eingesetzt werden. Die Aufnahme­frequenz dieser Kameras liegt bei der typischen Videobildrate (je nach Standard 25/30 Hz oder 50/60 Hz). Eine Besonderheit der in Konstanz verwendeten Kameras ist eine in mehreren Stufen einstellbare Bildrate zwischen 30 und 1200 Hz, die durch diese hohe zeitliche Auflösung sehr gut schnelle Bewegungen im sportlichen Kontext erfassen können¹⁹.

Im Allgemeinen können die verwendeten Kameras aufgrund fehlender externer Triggereingänge keine synchrone Bildaufnahme gewährleisten. Diese ist jedoch für eine genaue dreidimensionale Bewegungserfassung notwendig (Grün, 1997). Daher wird versucht, den zeitlichen Versatz zwischen den Aufnahmen der einzelnen Kameras durch zusätzliche Licht- oder Audiosignale zu ermitteln, um diesen nachträglich korrigieren zu können. Zu Beginn jeder Aufnahme wird dazu entweder eine von allen Kameras sichtbare Lampe eingeschaltet oder – falls die Kameras die Aufnahme von Audiosignalen unterstützen – mittels einer Startklappe oder einem Tongenerator, teilweise auch über Funk zur Vermeidung von Verkabelung bzw. unterschiedlichen Schalllaufzeiten (de Barros, Russomanno, Brenzikofer & Figueroa, 2006), ein eindeutiges Triggersignal erzeugt. Nach der Aufnahme werden manuell die Video- bzw. Audiospuren nach diesen Signalen abgesucht und der gemeinsame Beginn der Aufnahme festgelegt.

Zur Erfassung der Bewegung werden oft passive Marker an relevanten Körperpunkten angebracht, die eine gute Sichtbarkeit im aufgenommenen Videomaterial gewährleisten und dadurch einfach manuell oder auch halbautomatisch²⁰

¹⁹eine Beschreibung der Kameras findet sich in Abschnitt 4.1.1

²⁰Halbautomatisch bedeutet in diesem Zusammenhang eine automatische Verfolgung manuell angeklickter (und damit eindeutig benannter) Marker von Bild zu Bild.

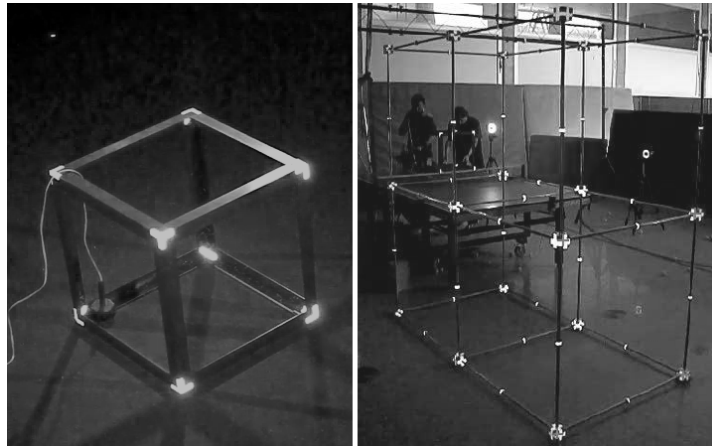


Abb. 2.4: Referenzrahmen an der Universität Konstanz

verfolgt werden können. Die Marker sind meist sog. Farbmarker, die sich farblich stark von der Umgebung unterscheiden. Ähnlich wie die in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Infrarotsysteme verwendet das Konstanzer System retroreflektierende Marker, die das von an den Kameras befestigten LED-Ringen emittierte Licht zurückstrahlen (vgl. Abb. 2.3). Falls das Anbringen von Markern – beispielsweise in Wettkampfsituationen – nicht möglich ist, werden die Körperpunkte in den Videodaten direkt manuell erfasst.

Zur Rekonstruktion der dreidimensionalen Bewegung aus den erfassten zweidimensionalen Bilddaten ist die Kenntnis des Abbildungsverhaltens und der Kamerapositionen und -orientierungen notwendig. Typischerweise bestimmt dies die verwendete Software durch eine Referenzrahmenkalibration mithilfe der direkten Lineartransformation (DLT, Abdel-Aziz und Karara, 1971). Dazu wird ein Referenzobjekt so im Messvolumen platziert, dass die später zu erfassende Bewegung innerhalb dieses Kalibrationsobjektes abgebildet wird (vgl. Abb. 2.4). Sind die Koordinaten der Passpunkte an den Referenzobjekten bekannt, ermittelt die verwendete Software mit den Kollinearitätsgleichungen die zur dreidimensionalen Erfassung notwendigen Kameraparameter. Teilweise erfolgt dabei zusätzlich eine Korrektur der Objektivverzeichnungen²¹. Sind die Kameraparameter bekannt, können für jeden Zeitpunkt die dreidimensionalen Positionen der in mindestens zwei Kameras sichtbaren, digitalisierten Marker rekonstruiert werden.

Schematisch ist der beschriebene Prozess in Abb. 2.5 dargestellt: Die Messaufgabe legt die Anzahl der zu erfassenden Personen sowie Art und Detaillierungsgrad ihrer Bewegung, das Messvolumen und die Umgebung sowie den Typ der Erfassung (markerbasiert / markerlos) fest. Abhängig davon wird Typ, Ein-

²¹Details dazu finden sich in den Abschnitten 3.2.2 und 3.3

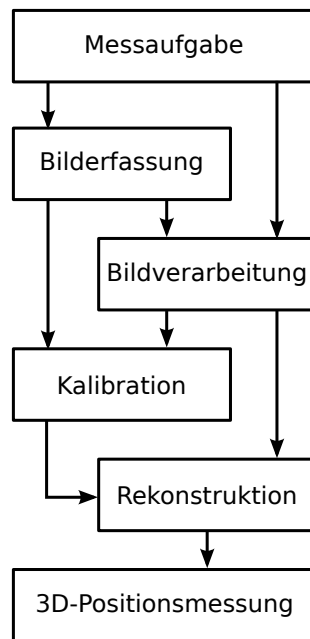


Abb. 2.5: Prozessschritte der Bewegungserfassung

stellungen und Anzahl der verwendeten Kameras sowie deren Position und Orientierung um das Messvolumen bestimmt (Bilderfassung). Je nach gewähltem Erfassungstyp der Personen kommen Bildverarbeitungsmethoden zum Einsatz, die z. B. eine automatische Erfassung farbiger oder retroreflektierender Marker ermöglichen. Diese Methoden kommen teils auch bei der Passpunktvermessung im Rahmen der Kamerakalibration zum Einsatz. Das dadurch ermittelte Abbildungsverhalten der Kameras und die identifizierten Markerpositionen in den Kamerabildern erlauben die Rekonstruktion der Objektpunktkoordinaten und somit die dreidimensionale Positionsmessung der einzelnen Marker.

2.4 Metrologische Perspektive

2.4.1 Der Begriff der Messunsicherheit

Bei jeder wissenschaftlichen Messung - unabhängig davon, wie sorgfältig sie durchgeführt wird - sind *Beobachtungs-* oder *Messwerte* mit unvermeidlichen *Messfehlern* behaftet. (Bronstein, Semendjajew & Musiol, 2005, S.809)

In der klassischen Testtheorie wird dieser Sachverhalt durch die Gleichung

$$Y = X + e \quad (2.1)$$

beschrieben, wobei Y das gemessene Ergebnis, X den wahren Wert und e die (zufälligen) Abweichungen vom wahren Wert, die Messfehler, darstellen. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich der gemessene Wert Y mit der Erhöhung der Messwiederholungen an den wahren Wert X annähert. Systematische Abweichungen (*bias*) vom wahren Wert werden hier nicht bzw. als bereits korrigiert betrachtet.

In der Metrologie wird die Genauigkeit (*accuracy*) einer Messung durch zwei Größen charakterisiert: durch die Richtigkeit (*trueness*), als die Abweichung des besten Schätzwertes vom wahren Wert, und durch die Präzision (*precision*), als die Streuung des besten Schätzwertes (vgl. Abb. 2.6, Hässelbarth, 2004). Die Präzision wird weiter unterteilt in die Wiederholbarkeit (*repeatability*), welche die zufälligen Abweichungen bei wiederholten Messungen in gleichen Bedingungen charakterisiert, und die Reproduzierbarkeit (*reproducibility*), mit welcher Variationen z. B. durch unterschiedliche Standorte, unterschiedliche Experimentatoren, o. Ä. berücksichtigt werden. Sim und Arnell (1993) sehen die Richtigkeit als eine operationalisierte Größe für die Validität und die Präzision für die Reliabilität einer Messung. Dabei ist die Objektivität, die Unabhängigkeit von der durchführenden Person, Voraussetzung für die Reliabilität und diese wiederum eine Voraussetzung für die Validität einer Messung (Diekmann, 2004).

In der Norm DIN1319-1: Grundlagen der Messtechnik (1995a) werden die genannten Messfehler Messabweichungen genannt und nach der Art ihrer Auswirkungen auf eine Messung in grobe e_{gross} , systematische e_{sys} und zufällige e_{rnd} Abweichungen unterteilt, aus denen sich das unkorrigierte Messergebnis additiv zusammensetzt (vgl. Abb. 2.7):

$$Y = X + e_{sys} + e_{rnd} + e_{gross} \quad (2.2)$$

Grobe Abweichungen (*Ausreißer*) entstehen meist durch falsche Bedienung des Messsystems (Abweichungen durch falsches Ablesen der Anzeige, falsche Eingaben, o. Ä.) und können mathematisch nicht sinnvoll behandelt werden. Durch

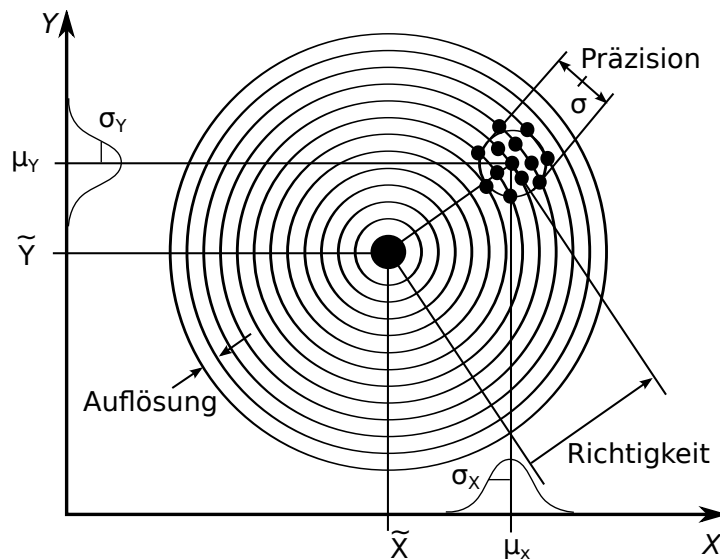


Abb. 2.6: Charakterisierung der Messgenauigkeit anhand der Präzision (Streuung der einzelnen Messwerte um ihren Mittelwert) und der Richtigkeit, die eine (systematische) Abweichung des Mittelwertes vom wahren Wert darstellt. Die durch die Zielscheibenkreise zugewiesenen diskreten Messwerte erlauben zudem eine bildliche Darstellung der Auflösung des Messsystems (modifiziert nach Schmidt, 2003).

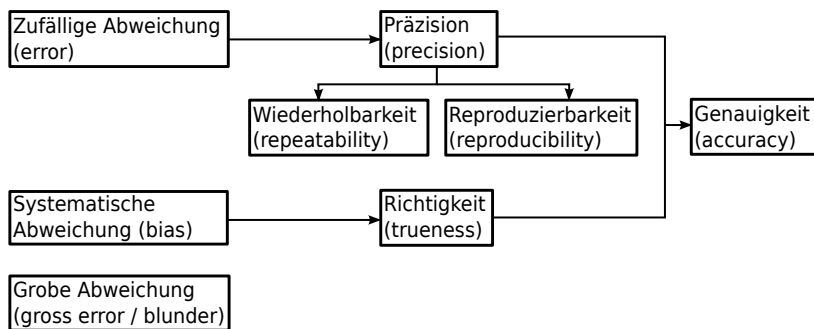


Abb. 2.7: Fehlerarten und ihr Bezug zu den Gütekriterien eines Messsystems

Erhöhung der Automatisierung eines Messsystems oder eine sinnvolle (fehler-tolerante) Gestaltung der Bedienelemente kann jedoch die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens verringert werden.

Systematische Abweichungen sind reproduzierbare Abweichungen, die aufgrund der Eigenschaften des Messsystems entstehen (z. B. bei der Messung einer elektrischen Spannung durch ein Messgerät mit einem endlich großen (Innen-)Widerstand, das durch den bei der Messung zusätzlich entstehenden Stromfluss die zu messende Spannung beeinflusst). Solche Abweichungen kön-

nen auch aufgrund der Abstraktion und Reduktion der Realität auf die Modellparameter entstehen. Bei ausreichender Kenntnis des Messsystems oder durch einen Vergleich mit anderen Messmethoden, z. B. im Rahmen externer Referenzmessungen, können diese systematischen Abweichungen bestimmt und Ausgleichsfunktionen zur Korrektur des Messwertes ermittelt werden.

Als zufällige Abweichungen werden diejenigen Abweichungen vom wahren Wert bezeichnet, die nach Korrektur der systematischen Abweichungen verbleiben. Sie sind unter anderem bedingt durch die endliche Genauigkeit aller Messsysteme und bewirken eine zufällige Streuung des aktuellen Messwerts um einen Erwartungswert und können daher im Allgemeinen nicht zur Korrektur des Messwertes herangezogen werden. Unter der Annahme einer guten Reproduzierbarkeit bewirkt die stochastische Natur dieser Abweichungen jedoch die Erhöhung der Wahrscheinlichkeit, durch Messwiederholungen einen guten Schätzer für den wahren Wert zu erhalten:

Unter Voraussetzung der Korrektur aller systematischen Abweichungen und für unendlich viele Messwiederholungen kann der wahre Wert X und dessen Varianz σ_x^2 bestimmt werden (Papula, 1999):

$$X = \bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3)$$

$$\sigma_x^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.4)$$

Bei realen Messungen mit nur endlich vielen Messwiederholungen kann ein Schätzer \hat{x} für den Mittelwert und ein Schätzer $\hat{\sigma}_x^2$ für die Varianz bestimmt werden (Papula, 1999):

$$\hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.5)$$

$$\hat{\sigma}_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.6)$$

Da in der messtechnischen Praxis nur endlich viele Messwiederholungen durchgeführt werden können und auch nach Ausschluss grober Abweichungen bei der Ermittlung und Korrektur systematischer Messabweichungen Unsicherheiten auftreten sowie (unbekannte) systematische Restabweichungen unkorrigiert bleiben, kann jede Messung unabhängig vom Grad der Sorgfalt der Durchführung nur einen Schätzer des wahren Wertes ermitteln.

Für die Beurteilung einer Messung ist damit die Güte dieses Schätzers relevant. Diese Güte wird als die *Messunsicherheit* bezeichnet (vgl. DIN1319-1: Grundlagen der Messtechnik, 1995a; Eisenhart, 1968), die zumindest in metrologischer Literatur als zwingende Angabe für ein vollständiges Messergebnis angesehen wird:

„... So, a result without reliability (uncertainty) statement cannot be published or communicated because it is not (yet) a result. I am appealing to my colleagues of all analytical journals not to accept papers anymore which do not respect this simple logic.“ (de Bièvre, 1997, S.269)

Da jedoch selbst im metrologischen Umfeld lange Zeit die Bestimmung der Messunsicherheit und die Art der Angabe nicht einheitlich geregelt war, konnten die verwendeten Messunsicherheitsangaben nicht als vergleichsfähiges Gütekriterium gesehen werden und hatten daher über das eigene Labor hinaus nur eingeschränkten Nutzen (Kimothi, 2002). Erst mit der Einführung des GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Deutsche Übersetzung: Leitfaden für die Angabe der Unsicherheit beim Messen), 1995b) wurde 1993 der Versuch unternommen, die Ermittlung und Behandlung der Messunsicherheiten weltweit zu standardisieren. Der GUM hat bis jetzt jedoch außerhalb der Metrologie wenig Bekanntheitsgrad in der wissenschaftlichen Welt erlangt, was durch den eher aufwändigen Prozess und die dazu notwendigen Kenntnisse in mathematischer Modellierung bedingt sein mag (Hennes, 2007). Im folgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM skizziert.

2.4.2 Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM

Die Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM erfolgt in drei Phasen: Formulierung, Unsicherheitsfortpflanzung und Zusammenfassung (Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1, 2008). Die Details des Prozesses sind in Abbildung 2.8 dargestellt. In der Formulierungsphase werden die Eingangs- und Ausgangsgrößen des Messprozesses definiert sowie die der Messung zugrundeliegende Prozessgleichung aufgestellt, welche die Beziehung zwischen den verschiedenen Eingangsgrößen x_i und der Messgröße y definiert:

$$y = f(X) \tag{2.7}$$

mit $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$

Ursprünglich beinhaltete der GUM nur die Vorgehensweise zur Formulierung univariater Messprozesse, folglich für Prozesse, die lediglich eine skalare Ausgangsgröße umfassten. Da die Anwendung des univariaten Konzeptes auf multivariate

2. STAND DER TECHNIK

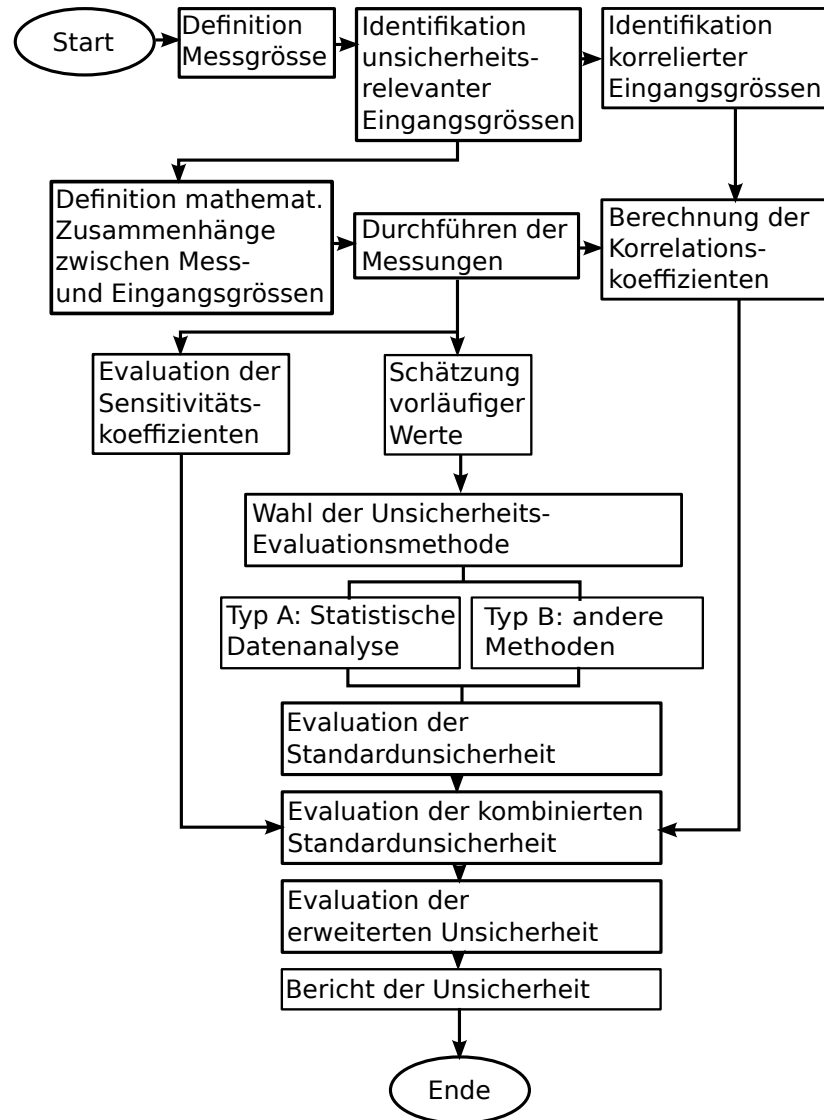


Abb. 2.8: Prozess zur Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM (modifiziert nach Kimothi, 2002)

Messprozesse zu Abweichungen in der Darstellung dieser Messergebnisse führte, wurde eine multivariate Erweiterung des GUM gefordert (Ezhela, 2007), die im Jahr 2011 mit dem Supplement 2 des GUM verabschiedet wurde (Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1, 2011). Dort wird die Prozessgleichung als eine Funktion verschiedener Eingangsgrößen x_i mit den resultierenden (multivariaten) Funktionswerten der Messgrößen y_j beschrieben:

$$Y = f(X) \quad (2.8)$$

$$\text{mit } X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$$

Zudem bietet der GUM auch die Möglichkeit die Abhängigkeit der Ausgangsgrößen in impliziter Form durch ein Messmodell zu beschreiben, welches mittels numerischer Schätzverfahren gelöst werden kann:

$$h(Y, X) = 0 \quad (2.9)$$

$$\text{mit } h = (h_1, h_2, \dots, h_m)^T$$

Darüber hinaus wird im GUM die Behandlung mehrstufiger Messprozesse beschrieben, beispielsweise bei der Erstellung einer Kalibrationsfunktion und der Ermittlung der zugehörigen Parameter (Stufe 1) und der späteren Verwendung dieser Funktion und der Parameter im Rahmen der Ermittlung der eigentlichen Messgröße (Stufe 2). Dabei werden zuerst die zur Stufe 1 zugehörigen Unsicherheiten ermittelt, bevor diese als Eingangsgrößen in die Ermittlung der Unsicherheit der eigentlichen Messgröße in Stufe 2 einfließen (Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1, 2008).

Nach dem Aufstellen der Prozessgleichung bzw. des Messmodells werden den Eingangsgrößen X Unsicherheiten in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet. Dies erfolgt im statistischen Sinn mittels wiederholter Messungen (Typ A) oder anhand von Intervallen oder Verteilungen aus vorhandenen Informationsquellen, z. B. Datenblättern, Kalibrationsunterlagen oder Expertenwissen (Typ B). Bei korrelierten Eingangsgrößen erfolgt die Zuordnung einer gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilung.

In einer zweiten Phase werden die ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilungen durch das Messmodell propagiert und dadurch zu einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Messgrößen Y vereinigt. In einfachen Fällen kann diese Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der resultierenden Messgröße analytisch erfolgen. Ist dies nicht möglich, wird das Messmodell durch eine Taylorreihenentwicklung 1. Ordnung an der Stelle des besten Schätzers linearisiert, eine Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung des Einflusses der einzelnen Eingangsgrößen auf die Messgröße (anhand partieller Ableitungen) durchgeführt und der Einfluss korrelierter Eingangsgrößen ermittelt. Die Propagierung der Unsicherheit für

2. STAND DER TECHNIK

eine skalare Ausgangsgröße wird dabei bei unkorrelierten Eingangsgrößen durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.10)$$

Sind die Eingangsgrößen korreliert, wird folgende Gleichung verwendet:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, y_i) \quad (2.11)$$

Für die Betrachtung vektorieller Größen beschreibt eine Kovarianzmatrix der Dimension $m \times m$ die Unsicherheitsverteilungen und korrelativen Abhängigkeiten der Ausgangsgrößen:

$$\mathbf{U}_Y = \begin{bmatrix} u(y_1, y_1) & u(y_1, y_2) & \dots & u(y_1, y_m) \\ u(y_2, y_1) & u(y_2, y_2) & \dots & u(y_2, y_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(y_m, y_1) & u(y_m, y_2) & \dots & u(y_m, y_m) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Diese erhält man durch Multiplikation der Jacobimatrix des Messmodells \mathbf{C}_X mit den Unsicherheiten der Eingangsgrößen \mathbf{U}_X :

$$\mathbf{U}_Y = \mathbf{C}_X \mathbf{U}_X \mathbf{C}_X^T \quad (2.13)$$

Dabei sind in der Jacobimatrix die partiellen Ableitungen nach allen Eingangsgrößen zusammengefasst:

$$\mathbf{C}_X = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial X_1} \right) & \left(\frac{\partial f_1}{\partial X_2} \right) & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial X_s} \right) \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial X_1} \right) & \left(\frac{\partial f_2}{\partial X_2} \right) & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial X_s} \right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_m}{\partial X_1} \right) & \left(\frac{\partial f_m}{\partial X_2} \right) & \dots & \left(\frac{\partial f_m}{\partial X_s} \right) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Sind die funktionalen Zusammenhänge nicht in expliziter Form bekannt, so beschreibt der GUM die Unsicherheitsfortpflanzung durch die Evaluation der impliziten Funktionalbeziehung 2.10 für die Werte $\mathbf{x} = \mathbf{X}$ und $\mathbf{y} = \mathbf{Y}$:

$$h(\mathbf{y}, \mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (2.15)$$

Analog zur skalaren Betrachtung in 2.11, ergibt sich die Unsicherheitsmatrix der Ausgangsgrößen durch:

$$\mathbf{C}_y \mathbf{U}_y \mathbf{C}_y^T = \mathbf{C}_x \mathbf{U}_x \mathbf{C}_x^T \quad (2.16)$$

Dabei sind in der Sensitivitätsmatrix der Ausgangsgrößen C_y die partiellen Ableitungen $\frac{\partial h_l}{\partial Y_j}$, $l = 1, \dots, m, j = 1, \dots, m$ zusammengefasst und in der Sensitivitätsmatrix der Eingangsgrößen C_x die partiellen Ableitungen $\frac{\partial h_l}{\partial X_i}$, $l = 1, \dots, m, i = 1, \dots, N$, die für die Werte $\mathbf{x} = \mathbf{X}$ und $\mathbf{y} = \mathbf{Y}$ ausgewertet wurden (Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1, 2011). Eine im GUM vorgeschlagene numerisch stabile Lösung der Gleichung 2.16 nach \mathbf{U}_y ist in Anhang A.1 dargestellt.

Alternativ kann die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messgröße auch mittels einer Monte-Carlo-Simulation bestimmt werden (Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1, 2011).

In einer dritten Phase wird der Erwartungswert der skalaren Messgröße y anhand der ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilung sowie die assoziierte Kovarianzmatrix bestimmt. Die daraus resultierende *kombinierte Standardunsicherheit* wird auf Basis der gewählten Überdeckungswahrscheinlichkeit zur kombinierten Messunsicherheit erweitert (typische Werte der Überdeckungswahrscheinlichkeit sind 0.95, 0.99 oder 0.999, weitere Details zur Bestimmung siehe Kimothi, 2002 bzw. Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1, 2011). Tritt an die Stelle der skalaren Messgröße y eine vektorielle Größe Y so ergeben sich Konfidenzregionen entsprechend der Dimensionalität des Vektors. Im GUM werden zur Bestimmung der Konfidenzregionen zwei Varianten vorgestellt (Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1, 2011). Die eine Variante bezieht die Abhängigkeiten zwischen den Dimensionen, die durch die Kovarianzanteile in der entsprechenden Matrix quantifiziert werden, mit in die Bestimmung ein. Das Ergebnis entspricht einem (Hyper-)Ellipsoid identisch zur Vektordimension, dessen Radien von der gewählten Überdeckungswahrscheinlichkeit abhängen. In der anderen Variante werden die Konfidenzintervalle der einzelnen Dimensionen separat bestimmt und aus diesen Größen ein der Dimension des Vektors entsprechendes (Hyper-)Rechteck gebildet, in dem die Überdeckungswahrscheinlichkeit mindestens dem gewählten Betrag entspricht. Für den bivariaten (zweidimensionalen) Fall sind diese in Abb. 2.9 dargestellt. Deutlich wird dabei der Unterschied zwischen den beiden Berechnungsarten vor allem bei starken Korrelationen unter den Dimensionen, in denen die (Hyper-)Rechtecklösung einen wesentlich größeren Unsicherheitsbereich ergibt (rechtes Diagramm).

2.4.3 Messunsicherheit in der Bewegungserfassung

Die optischen Aktiv- und Passivmarkersysteme gelten als *Goldstandard* der aktuellen Bewegungserfassungssysteme im Hinblick auf die erzielbare Genauigkeit. Messunsicherheiten werden jedoch nicht berichtet. Werden Messabweichungen angegeben, unterscheidet sich die Art, wie Richtigkeit und Präzision operatio-

2. STAND DER TECHNIK

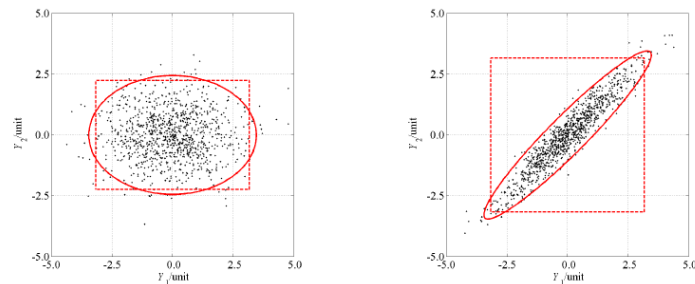


Abb. 2.9: Für den zweidimensionalen Fall können aus in diesem Fall bivariaten Gaussverteilungen elliptische und rechteckige Konfidenzregionen gebildet werden. Mit den elliptischen Konfidenzregionen werden zusätzlich die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Dimensionen bei der Bildung der Vertrauensbereiche abgebildet (Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1, 2011).

Tab. 2.1: Literaturübersicht zur Quantifizierung von Präzision und Richtigkeit in der Bewegungserfassung (modifiziert und erweitert nach Lüthi, 2010)

Quelle	Richtigkeit	Präzision
Fioretti, Germani und Leo (1985)	Mittelwert des absoluten Fehlers eines Markers über alle Frames	–
Scholz (1989)	Mittelwert des absoluten Fehlers eines Markers über alle Frames	Intra-class-correlation Koeffizient Standardabweichung eines Markers über alle Frames
Ehara, Fujimoto, Miyazaki, Tanaka und Yamamoto (1995)	Mittelwert des absoluten Fehlers eines Markers über alle Frames maximaler Fehler	Standardabweichung eines Markers über alle Frames
Klein und DeHaven (1995)	Mittelwert der Differenz zwischen wahrer Position und berechneter Position	–
Ehara u. a. (1997)	Mittelwert des absoluten Fehlers eines Markers über alle Frames maximaler Fehler	Standardabweichung eines Markers über alle Frames
Everaert, Spaepen, Wouters, Stappaerts und Oostendorp (1999)	Mittelwert des absoluten Fehlers eines Markers über alle Frames maximaler Fehler	Standardabweichung eines Markers über alle Frames Mittelwert der Standardabweichung über alle Versuche Root Mean Square (RMS) der Differenz von Mittelwert der Markerposition aller Frames und der Position in jedem einzelnen Frame
Richards (1999)	maximaler Fehler	–
Bhimji, Deroy, Baskin und Hillstrom (2000)	RMS der Differenz zwischen der wahren Position und der gemessenen Position	–
Windolf, Götzen und Morlock (2008)	Mittelwert der absoluten Fehler über alle Marker und Frames	Standardabweichung über alle Marker und Frames

nalisiert werden (vgl. Tabelle 2.1). Prinzipiell wurden alle berichteten Messabweichungen applikations- und situationsspezifisch im Rahmen von Validierungsstudien für unterschiedliche Messvolumen und Kameras ermittelt und sind somit betragsmäßig nicht vergleichbar (Ehara u. a., 1997, 1995; Everaert, Spaepen, Wouters, Stappaerts & Oostendorp, 1999; Richards, 1999; Windolf, Götzen & Morlock, 2008). Berichtet werden meist Mittelwert und Standardabweichung der absoluten Messabweichungen. Nur Maletsky, Sun und Morton (2007) geben zu den ermittelten Messabweichungen Konfidenzintervalle an. Es wurde keine Studie gefunden, in der explizit das Konzept der Messunsicherheit nach GUM Anwendung fand. Lediglich in der Validierungsstudie des VICON-Systems im Sensomotoriklabor der Universität Bern wurde auf Anraten des Autors eine erweiterte²² Messunsicherheit von 0.409 mm in einem Messvolumen von 5 m x 8 m x 3 m ermittelt (Lüthi, 2010). Ähnliche Größenordnungen der Messabweichungen geben die Hersteller aktiver Systeme an (z. B. Optotrak Census 0.1 mm²³), die im Vergleich zu anderen auftretenden Fehlern bei der Bewegungserfassung (z. B. Soft-Tissue-Artifacts, vgl. Leardini u. a., 2005) einen vernachlässigbar kleinen Wert darstellen. In den meisten Publikationen wird daher lediglich der Typ des verwendeten Messsystems genannt und auf eine explizite Angabe einer Messunsicherheit verzichtet. Ist dies bei der Anwendung kommerzieller Systeme aufgrund ihrer im Vergleich geringen Messunsicherheiten nachvollziehbar, lässt diese Vorgehensweise jedoch die Überprüfbarkeit der Güte der ermittelten Ergebnisse außen vor.

Für markerlose Systeme berichten Corazza, Mündermann, Gambaretto, Ferrigno und Andriacchi (2010) unter idealen Bedingungen (enganliegende Kleidung, statischer Hintergrund) Abweichungen von ca. 15 mm pro Gelenk, wobei die durchschnittliche Rekonstruktionsabweichung zwischen 30-50 mm liegt (Sigal & Black, 2010). Diese Größen wurden mit dem „HumanEva-I“ Datensatz ermittelt, der neben den sieben zur Auswertung genutzten Videosequenzen zu den Videobildern synchrone Positionen und Orientierungen der Körpersegmente bereitstellt und somit einen direkten Vergleich der Güte der markerlosen Datenerfassung mit der markerbasierten Methode erlaubt (Sigal & Black, 2010).

Aufgrund der Vielzahl verschiedener Systeme und der starken Abhängigkeit der erzielbaren Genauigkeit von den einzelnen Systemkomponenten der Passivmarkersysteme (Kameras, Objektive, Software) sind kaum Genauigkeitsangaben für diese bekannt. Ehara u. a. (1997) berichten 12 mm Positionsabweichung, Richards (1999) 2.1° Rotationsabweichung für das APAS System. Zu diesen Werten vergleichbare Abweichungen beschreiben Briggs, Tyler und Mullineaux

²²bei einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$

²³<http://www.ndigital.com/lifesciences/certus-techspecs.php> [02.09.2010]

(2003) für ein SIMI Motion System mit zwei Sony Digitalvideokameras (7 mm resp. 2.0°).

Dass solche Werte lediglich als Referenz für die jeweilige Anwendungssituation gelten können, soll am Beispiel des Konstanzer Systems deutlich gemacht werden: Die eingesetzte Software SIMI Motion (vgl. Abschnitt 2.2.2) ermöglicht eine Kalibration und eine Bestimmung der Kalibrationsgüte mittels eines „Konsistenzchecks für alle angeklickten Punkte“. Dabei „[...] entfernt [die Software] vorübergehend den ersten Punkt aus der Menge der Kalibrierungspunkte und kalibriert die Kamera mit den verbleibenden Punkten. Dann wird berechnet, wo der erste Punkt, dessen echte 3D-Koordinaten ja bekannt sind, im Kamerabild liegen müsste. Das Ergebnis wird mit der tatsächlich erfassten Bildposition verglichen und die Differenz in Prozent der Bildgröße ausgegeben. Dieser Wert sollte stets kleiner als 1% sein. Diese Vorgehensweise wird dann für jeden einzelnen Kalibrierungspunkt wiederholt.[...] Man sollte versuchen, die Kalibrierung zu verbessern, solange die Prozentwerte über 1-2% liegen“²⁴. Allerdings gestaltet sich dies schwierig, da nur „wenn alle Punkte – bis auf einen – genau geklickt wurden, [...] die Fehlerquelle leicht [zu] erkennen [ist]. Normalerweise kann man die Ursache nicht direkt erkennen, wenn mehrere Punkte ungenau erfasst wurden, da Seiteneffekte zwischen den Punkten auftreten“²⁵. Allein schon die Abhängigkeit der entstehenden Ungenauigkeit von der verwendeten Kameraauflösung zeigt auf, dass dieser Wert bestenfalls ein erfahrungsbasierter Richtwert für eine typische Kamera sein kann, keinesfalls jedoch einer messtechnisch korrekten Abschätzung der Rekonstruktionsfehler dienen kann. Bei einem angenommenen Grenzwert von 1% bedeutet dies, dass der erfasste Punkt beispielsweise bei einer Kamera mit einer Auflösung von 512 x 384 Pixel um 5.12 bzw. 3.84 Pixel von der berechneten Position abweicht. Bei kompletter Abbildung eines Referenzrahmens von 2 m x 2 m x 1 m, wird ein Marker mit 30 mm Durchmesser auf 4-10 Pixeln abgebildet²⁶. Damit entspricht ein Pixel je nach Entfernung des Markers von der Kamera 3-7.5 mm. Multipliziert man dies mit der Kalibrationsungenauigkeit ergibt sich im schlechtesten Fall ein Wert von 7.5 mm/Pixel · 5.12 Pixel = 38.4 mm. Allein durch die Kalibrationsungenauigkeit erhält man in diesem Beispiel einen Projektionsfehler von bis zu 38.4 mm.

Dazu kommt die bereits genannte Messabweichung durch die nicht vorhandene Synchronisierungsmöglichkeit der Kameras. Bei einer Erfassung mit einem Versatz von einem Bild (NTSC Standard, +/- 16.7 ms) stellten de Barros u. a. (2006) einen Fehler von 3.79 mm für eine Streckenmessung von 300.1 mm bei einer maximalen Geschwindigkeit von 5 m/s in einem kalibrierten Messvolumen

²⁴Zitat aus der Onlinehilfe zum Programm Simi Motion

²⁵Zitat aus der Onlinehilfe zum Programm Simi Motion

²⁶diese Daten basieren auf dem Kamerasystem der Universität Konstanz und sollen hier nur als Rechenbeispiel dienen.

von 2.5 m x 2 m x 0.5 m fest. Geht man vereinfacht von einem proportionalen Fehleranstieg aus, so würden bei schnellen Bewegungen von 20 m/s²⁷ durch ein Bild Versatz eine Positionsabweichung von mehr als 15 mm entstehen. Bei guter manueller Ausrichtung der Videos ist dies der maximal auftretende Versatz zu Beginn der Aufnahme. Da die Bildraten der Kameras jedoch von unabhängigen Taktgeneratoren mit geringen Abweichungen in der Frequenz erzeugt werden, vergrößert sich dieser Versatz mit der Länge der Aufnahme und somit auch die durch ihn entstehende Positionsabweichung.

Das Beispiel zeigt, dass die Genauigkeit der in der sportwissenschaftlichen Feldforschung angewendeten Systeme stark eingeschränkt sein kann: Summiert man die exemplarisch ermittelten Abweichungen, befindet man sich bereits jenseits der angegebenen Fehlergrößen für markerlose Systeme, mit denen bestimmte Bewegungsmerkmale schon nicht mehr reliabel erfasst werden können (vgl. Abschnitt 2.2.4). Schon dadurch ist die Anwendbarkeit eines solchen Systems für viele Bereiche bereits in Frage gestellt. Kritischer ist jedoch, dass keine Messunsicherheit angegeben werden kann, die eine objektive Bewertung der Güte des Erfassungssystems bzw. -setups ermöglichen würde, sondern dass die Abweichungen abhängig von der erfassten Bewegung und der Systemkonfiguration sowie mit der Dauer der Aufnahme variieren.

²⁷als realistischer Beispielwert für schnelle menschliche Bewegungen; Kong, Luk und Hong (2000) berichten eine maximale Geschwindigkeit des Sprunggelenks von 26.26 m/s während eines Roundhouse-Kicks im Taekwondo.

2.5 Forschungsfrage und Vorgehensweise

Bislang wurde nach einer kurzen Einführung der Stand der Technik aufbereitet. Dazu sind zu Beginn Grundlagen und verschiedene Systemtypen zur Erfassung menschlicher Bewegung beschrieben worden, bevor in Abschnitt 2.3 das Konstanzer System als ein exemplarisches, in der Sportwissenschaft aufgrund seiner Flexibilität häufig verwendetes Consumer-Kamera-basiertes Bewegungserfassungssystem vorgestellt wurde. Ein Überblick über die Bestimmung der Messunsicherheit machte deutlich, dass die entstehenden Messabweichungen bei dieser Art von Bewegungserfassungssystemen wesentlich höher als bei den kommerziellen Systemen sein können, die Behandlung dieser jedoch – falls sie erfolgt – nicht dem Stand der Technik entspricht. Im wissenschaftlichen Kontext – zumindest jedoch bei der Verbindung mit weiterführenden biomechanischen Analysemethoden – sollten diese Systeme daher ohne eine anwendungsspezifische Bestimmung der Reliabilität und Validität nicht genutzt werden. Dies ist zum einen – soweit dem Autor bekannt – nicht gängige Praxis, zum anderen steht die Validierung jeder einzelnen Systemkonfiguration auch entgegen der gewünschten Flexibilität der Consumer-Kamera-Systeme zur Bewegungserfassung in der sportwissenschaftlichen Feldforschung und ist auch ökonomisch meist nicht vertretbar. Aus diesen Gründen kann folgende Forschungsfrage formuliert werden:

Welche methodischen Änderungen ermöglichen zum einen eine Reduktion, zum anderen eine (automatisierte) Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM für die dreidimensionale Erfassung menschlicher Bewegung mit Consumer-Kameras?

Zur Beantwortung dieser Frage richtet sich die weitere Arbeit nach der im GUM vorgeschlagenen Vorgehensweise zur Bestimmung der Messunsicherheit, wobei mögliche Reduktionen entstehender Messunsicherheiten parallel dazu betrachtet werden:

Der erste Schritt in der Vorgehensweise nach GUM ist die Definition der Messgröße. Für die menschliche Bewegungserfassung typische Messgrößen sind meist die Positionen von Gelenkzentren oder die Position und Orientierung von Körpersegmenten, da diese als Eingangsgrößen für die anschließende mathematisch-physikalische Körpermodellierung dienen. Für die vorliegende Arbeit werden jedoch die dreidimensionalen Trajektorien der an der Person angebrachten Marker bzw. der angeklickten Gelenkpunkte als finale Messgröße definiert (vgl. auch Abschnitt 2.1), die durch eine dreidimensionale Matrix $T = (t, n, k)^T$ beschrieben werden können. Dabei entspricht t dem Zeitpunkt, n der eindeutigen Markernummer und k der jeweiligen Dimension der zugehörigen dreidimensiona-

len Koordinaten $X = (x, y, z)^T$. Zuerst wird diese hochdimensionale Form der Notation verwundern, kann der Prozess auf den ersten Blick auf die Bestimmung der Koordinaten eines Markers zu einem Zeitpunkt reduziert werden. Allerdings sind von der Ermittlung dieser Einzelgröße bis hin zu den finalen Trajektorien noch einige Unsicherheitsfaktoren vorhanden, die für eine umfassende Betrachtung der Messunsicherheit behandelt werden müssen. Eine Ausweitung des formalen Konzepts der Messunsicherheitsbetrachtung auf die oben genannten Positionen von Gelenkzentren oder Position und Orientierung von Körpersegmenten wäre prinzipiell möglich, würde jedoch den Rahmen der Arbeit sprengen, da nicht nur die verwendeten Marker und die betrachtete Bewegung, sondern auch die individuellen anthropometrischen Merkmale der erfassten Person mit in die Bestimmung eingehen würden. Zudem ist dieser Bearbeitungsschritt nicht nur für Consumer-Kamera-basierte Messsysteme, sondern für alle Arten von Bewegungserfassungssystemen relevant. Daher finden sich bereits verschiedene methodische Ansätze in der Literatur (z. B. Andersen, 2009; Cerveri, Pedotti & Ferrigno, 2005; Donati, Camomilla, Vannozzi & Cappozzo, 2007, 2008; Gamage & Lasenby, 2002; Karlsson & Tranberg, 1999; Lucchetti, Cappozzo, Cappello & della Croce, 1998), von denen Peters u. a. (2010) einige in einem Review verglichen haben, die als Ausgangspunkt für die Erweiterung der Messunsicherheitsbetrachtung dienen können.

Nach der Definition der Messgröße sieht der GUM in einem nächsten Schritt die Bestimmung aller unsicherheitsrelevanten Eingangsgrößen vor. Wie schon in Abschnitt 2.3 dargestellt, ist die Bewegungserfassung ein mehrstufiger Messprozess, dessen Einzelkomponenten stark voneinander abhängen (vgl. Abb. 2.10). Zudem werden je nach Anwendung auf den verschiedenen Stufen unterschiedliche Methoden eingesetzt (z. B. die Erfassung mit oder ohne Markern), die teils unterschiedliche Eingangsgrößen aufweisen. Dementsprechend komplex wäre es, alle unsicherheitsrelevanten Eingangsgrößen theoretisch herzuleiten, um die mathematische Gleichung des Messprozesses aufzustellen. Daher werden die für den Messprozess relevanten, in Abb. 2.10 dargestellten Einzelschritte separat behandelt und deren Zusammenhang im Folgenden erläutert. Dabei beeinflusst zwar die der Messung zugrundeliegende Messaufgabe sowohl die Wahl der Hardware als auch die erreichbare minimale Messunsicherheit; für die Bestimmung der Messunsicherheit in dieser Arbeit wird diese aber als gegeben und unveränderlich angenommen.

Das primäre Messmittel sind hardwareseitig zweifelsohne die verwendeten Kameras. Da diese zudem der Hauptunterschied der in dieser Arbeit betrachteten Systeme im Gegensatz zu den kommerziellen Systemen sind, liegt es nahe in einem ersten Schritt die Grundlagen der Messung mit Kameras sowie Besonderheiten von Consumer-Kameras detailliert zu betrachten (Abschnitt 3.1). Da die Bildmessung anhand einer mathematisch-physikalischen, funktionalen Modellie-

2. STAND DER TECHNIK

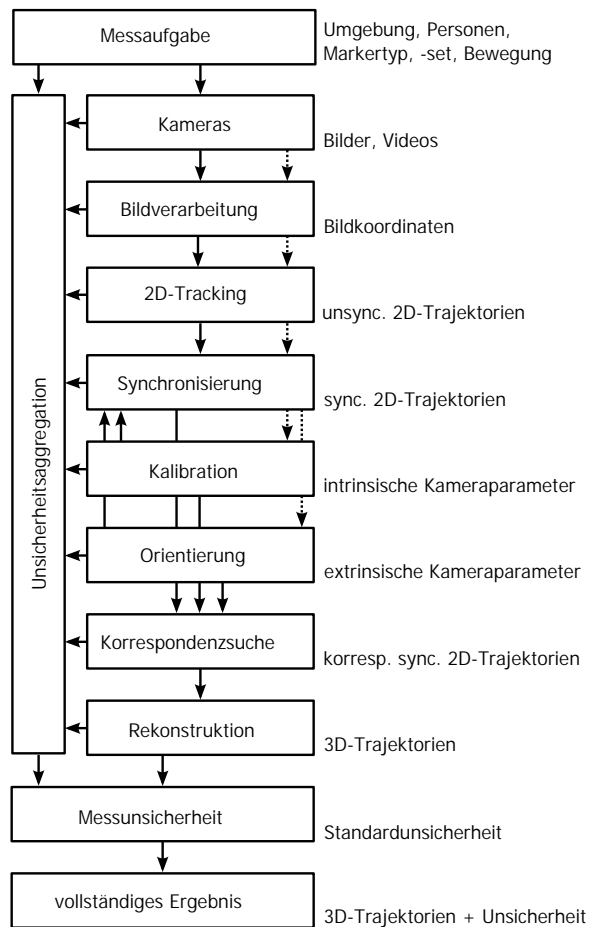


Abb. 2.10: Schematische Prozessschritte der Bewegungserfassung mit Unsicherheitsbetrachtung. Die gepunkteten Pfade stellen den Ablauf bei zeitlich getrennter Kalibration und Orientierung dar, die vollen Linien den der eigentlichen Bewegungserfassung.

Die Erfassung von Kameraparametern erfolgt, begründet die Erarbeitung dieser Methoden im Abschnitt 3.2 bereits einen zentralen Teil der Prozessgleichung zur Bestimmung der Messunsicherheit. Im Abschnitt 3.3 werden relevante Methoden zur Parameteridentifikation dieser Kameramodelle und die dabei entstehenden Unsicherheiten dargestellt.

Der nächste Teil der Arbeit beschreibt die weiteren für die Bewegungserfassung mit Consumer-Kameras relevanten Prozessschritte im Hinblick auf das Konstanzer System. Dabei werden auf Basis verschiedener Hardwaretests die Besonderheiten der verwendeten Kameras identifiziert (Abschnitt 4.1). Da zur Parameterbestimmung der Kameramodelle prinzipiell mathematische Beziehungen zwischen Objektpunkten (Passpunkten, vgl. Abschnitt 2.3) und den entsprechenden Bildpunkten in der Kamera aufzustellen sind, müssen die Koordinaten

der in den Videos aufgenommenen Objektpunkte bestimmt werden. Gleiches gilt bei der eigentlichen Bewegungserfassung für die Extraktion der Marker- oder Gelenkpunktkoordinaten aus dem Videomaterial. Abhängig vom gewählten Grad der Automatisierung und vom Typ der Objektpunkte sind dazu verschiedene Methoden der Bildverarbeitung notwendig, die eine unterschiedliche Ermittlungsgenauigkeit der Bildkoordinaten aufweisen und damit für die Messunsicherheitsbetrachtung relevant sind (vgl. Abb. 2.10 „Bildverarbeitung“ bzw. Abschnitt 4.2). Aus den so gewonnenen einzelnen Bildkoordinaten automatisiert zugehörige zweidimensionale Trajektorien zu ermitteln, ist bis auf den Fall eines einzelnen Markers oder Gelenkpunktes nicht trivial. Unbekannte Bewegungen und Verdeckungen müssen berücksichtigt werden, Fehler bzw. Unsicherheiten bei der Bestimmung gehen auch hier in den weiteren Prozess ein. Daher werden in einem nächsten Schritt verschiedene Tracking-Methoden zur Bestimmung zeitlicher Trajektorien betrachtet (Abschnitt 4.2.4). Unter anderem die bereits genannte Problematik der fehlenden Synchronisierungsmöglichkeit der Consumer-Kameras führt zu einer Verletzung der für die dreidimensionale Rekonstruktion notwendigen zeitgleichen Aufnahme der Objektpunkte aus unterschiedlichen Kameraperspektiven und ist dementsprechend auch eine unsicherheitsrelevante Eingangsgröße für den Messprozess. Daher werden in den Abschnitten 4.2.5 und 4.2.6 verschiedene Methoden zur Korrektur dieser Fehler vorgestellt. Abschließend müssen die räumlichen Korrespondenzen der gewonnenen synchronisierten Marker- oder Gelenkpunkttrajektorien untereinander ermittelt werden, die als Eingangsgrößen für die Algorithmen zur dreidimensionalen Rekonstruktion der Objekttrajektorien dienen (Abschnitt 4.2.7).

Anschließend wird in Abschnitt 4.3 die Implementierung der Systemvarianten und die durchgeführten Simulationen und Tests beschrieben, bevor eine theoretische Messunsicherheitsbetrachtung für diese Varianten erfolgt (Abschnitt 4.4). Das Ende des analytisch-empirischen Teils bildet der Bericht der Ergebnisse der durchgeführten Simulationen, Systemtests sowie der abschließenden Validierungsmessung (Abschnitt 5).

Nach einer Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse schließt die Arbeit mit einer Diskussion sowie einem Ausblick auf sich aus der Entwicklung ergebende zukünftige Forschungsfragen (Abschnitt 6).

Modellierung von Consumer-Kameras

Das primäre Messmittel der in dieser Arbeit betrachteten Systeme ist die digitale Amateur-Videokamera. Im folgenden Abschnitt werden daher zunächst die funktionalen Hauptkomponenten und Besonderheiten solcher Consumer-Kameras beschrieben. Zur präzisen und reliablen Messung mit Kameras notwendige Methoden sind seit Anfang des 20. Jahrhunderts Forschungsgegenstand der analytischen Photogrammetrie. In einem nächsten Abschnitt erfolgt daher ein Überblick über die dort betrachtete funktionale und mathematische Modellierung des Abbildungsverhaltens idealer und realer Kameras. Anschließend werden Methoden zur Parameteridentifikation der gewählten mathematischen Modelle sowie das Prinzip der dreidimensionalen Positionsmessung vorgestellt, bevor die bei der Messung entstehenden Unsicherheiten betrachtet werden. Abschließend werden die Stärken und Schwächen der vorgestellten Parameteridentifikationsmethoden zusammengefasst.

3.1 Kamerahardware

Objektiv, Verschluss und Aufnahmemedium können als die drei wichtigsten funktionalen Komponenten einer Kamera im Bezug auf die Modellierung ihres Abbildungsverhaltens betrachtet werden. Das aus einem optischen Linsensystem bestehende Objektiv projiziert das Motiv aus dem Objektraum in den Bildraum. Diese schematisch in Abbildung 3.1 skizzierte Projektion auf das Aufnahmemedium wird in der Strahlenoptik durch die Linsengleichungen beschrieben (vgl. z. B. Haferkorn, 2003; Kurzweil, Frenzel und Gebhard, 2009; Luhmann, 2010):

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \quad (3.1)$$

$$z \cdot z' = -f'^2 \quad (3.2)$$

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

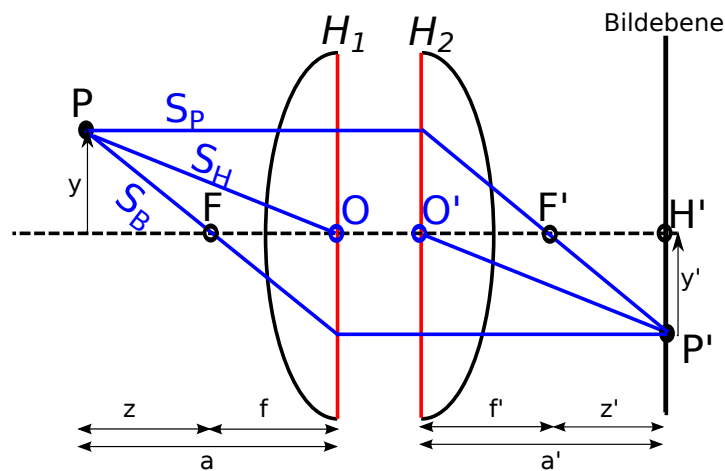


Abb. 3.1: Optische Abbildung (modifiziert nach Luhmann, 2010)

Dabei haben die in Abb. 3.1 genannten Parameter folgende Bedeutung (Luhmann, 2010):

P, P'	Objektpunkt und Bildpunkt
a :	Dingweite (Gegenstandsweite)
a' :	Bildweite
f, f' :	Ding- und bildseitige Brennweite
z, z' :	Brennpunktbezogene Bildweite
y, y' :	Gegenstandshöhe, Bildhöhe
H_1, H_2 :	Ding- und bildseitige Hauptebenen
H' :	Autokollimationspunkt auf der Bildebene
F, F' :	Ding- und bildseitige Brennpunkte
O, O' :	Optische Hauptpunkte
S_P :	Parallelstrahl
S_H :	Hauptstrahl
S_B :	Brennstrahl

Damit können die wichtigsten Parameter der optischen Abbildung für dünne Linsen mit den folgenden Begriffen beschrieben werden (vgl. Abb. 3.1, für eine detailliertere Beschreibung siehe auch Haferkorn, 2003; Luhmann, 2010):

- die *optische Achse* durch die Mittelpunkte O und O' der Hauptebenen H_1 und H_2 , die sog. optischen Hauptpunkte
- die *Dingweite* a , der Abstand des abzubildenden Objektes von der Linse,
- die *Bildweite* a' , der Abstand des Aufnahmemediums vom Objektiv bzw. der Linse,

- der sich aus dem Verhältnis von Ding- zu Bildweite ergebende *Abbildungsmaßstab* des Objektivs $\beta' = y'/y = a'/a$, sowie
- die ding- bzw. bildseitige *Brennweite*, die dem Abstand der Linse von ihrem ding- bzw. bildseitige Brennpunkt entspricht, wobei
- der *Brennpunkt* F den Punkt beschreibt, an dem parallel auf die Linse treffende Lichtstrahlen aufeinander treffen.

Eine weitere Funktion des Objektivs ist die Fokussierung – das *Scharfstellen* – des Motivs auf dem Aufnahmemedium. Dieser Vorgang ist notwendig, da die Abstände der abzubildenden Objekte zum Objektiv unterschiedlich groß sind und somit das Licht nicht parallel auf das Objektiv auftrifft, sondern als eine Punktquelle wirkt. Die Position des Bildpunktes einer Punktquelle ist abhängig vom Abstand dieser von der Linse und dementsprechend je nach Motiv unterschiedlich. Um diesen Bildpunkt mit der Bildebene in Deckung zu bringen, wird entweder der Abstand des gesamten Linsensystems zur Bildebene verändert (Außenfokussierung) oder einzelne Linsengruppen im Objektiv werden zueinander verschoben (Innenfokussierung), bis sich die von einem Punkt auf dem scharfzustellenden Objekt ausgesendeten Lichtstrahlen in einem Punkt auf der Bildebene treffen und damit der Bildpunkt direkt auf die Bildebene verschoben wurde. Dabei wird ein Objektpunkt P im Abstand a scharf auf der Bildebene abgebildet, wenn sich diese im Abstand a' von der bildseitigen Hauptebene befindet. Mit steigender Aufnahmeentfernung a nähert sich a' an die Brennweite f' an (Luhmann, 2010).

Im Gegensatz zu Objektiven mit fester Brennweite ermöglichen Zoomobjektive durch zusätzliche Linsengruppen im Objektiv die variable Einstellung des Abbildungsmaßstabes, also des Verhältnisses der Größe eines abzubildenden Objektes („Gegenstandsgröße“) zur Größe auf dem Aufnahmemedium („Bildgröße“). Dabei beruht das Wirkprinzip des Zoomobjektivs auf der Variation des Strahlenverlaufs mittels der Verschiebung einer Streuungslinse zwischen zwei Sammellinsen (Abb. 3.2).

Ein weiterer Bestandteil des Objektivs ist eine in ihrer Öffnungsweite verstellbare Blende (Abb. 3.3). Diese ist so im Linsensystem des Objektivs positioniert, dass sie die Menge des durchgelassenen Lichtes variiert ohne die Größe des projizierten Bildausschnitts zu verändern. Diese sogenannte *Aperturblende* dient der Anpassung des Objektivs an die Helligkeit des abzubildenden Motivs und der Aufnahmeumgebung und ist meist als Irisblende realisiert (Abb. 3.4). Die Öffnung der Blende wird als Blendenzahl angegeben, die das Verhältnis von Brennweite zu Öffnungsweite beschreibt (engl. *f-stop*, typische Größen: 1:1.4 - 1:22).

Mit zunehmendem Verschluss der Blende nimmt der Lichteinfall durch das Objektiv ab und gleichzeitig die Schärfentiefe des aufgenommenen Motivs zu. Diese im Englischen *Depth-of-Field (DoF)* genannte Größe, ist ein Maß für die räumliche Ausdehnung der scharfen Abbildung um das fokussierte Objekt

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

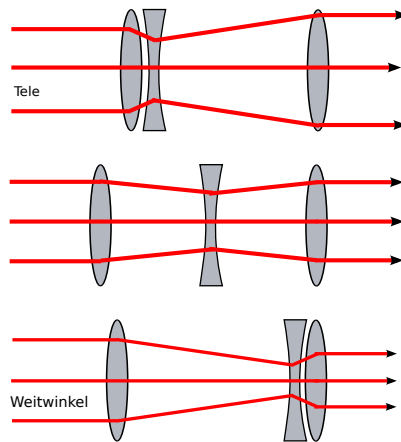


Abb. 3.2: Prinzip des Zoomobjektivs: die Variation des Strahlengangs durch eine verschiebbare Streuungslinse ermöglicht die Anpassung des Abbildungsverhaltens vom Teleobjektiv (oben) bis zum Weitwinkelobjektiv (unten).

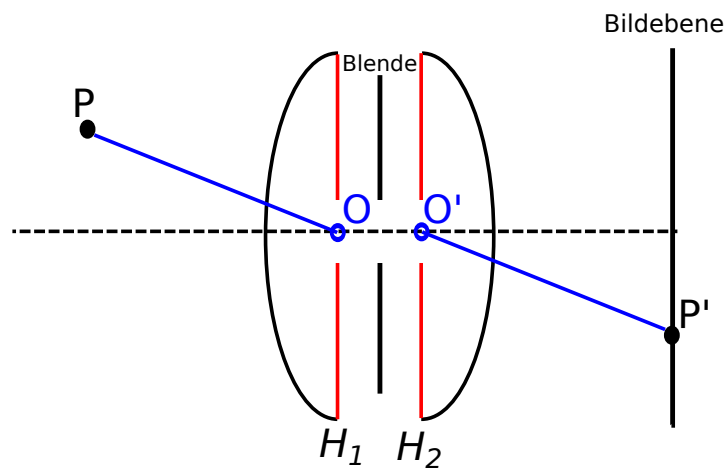


Abb. 3.3: Optische Abbildung mit (Apertur-)Blende im Strahlengang (modifiziert nach Luhmann, 2010)



Abb. 3.4: Schematische Darstellung einer Irisblende zur Regulierung des Lichtdurchlasses: die Größe der kreisförmigen Blendenöffnung kann durch die Position beweglicher Lamellen verändert werden (modifiziert nach <http://www.sitecrea.de/Irisblende/blende1.html> [10.08.2008]).

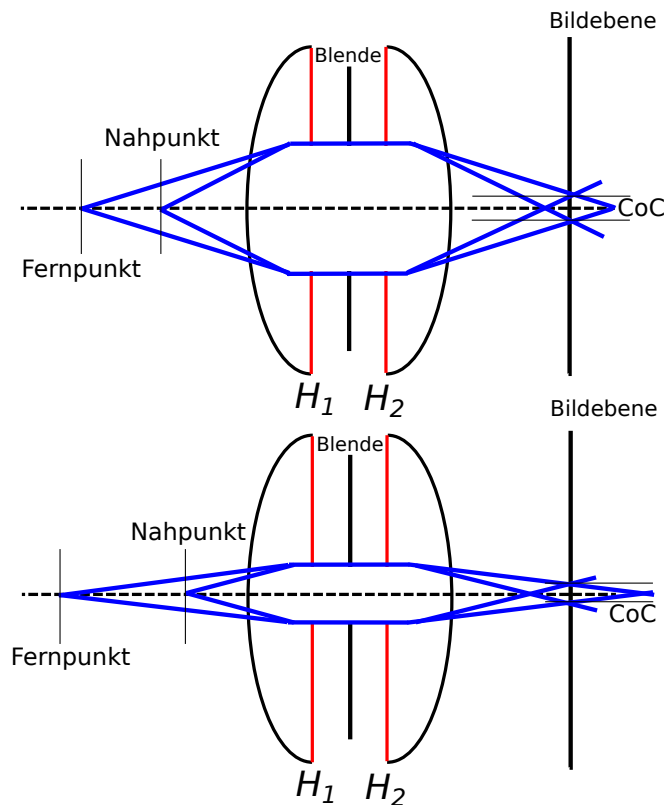


Abb. 3.5: Durch die unterschiedliche Größe des Lichtkegels abhängig von der Blendenöffnung wird zusätzlich zur Auflösung und Helligkeit des abgebildeten Motivs die Schärfentiefe beeinflusst (oben: bei offener Blende kleine Schärfentiefe, unten: bei kleinerem Blendendurchmesser größere Schärfentiefe). Diese ist bestimmt durch den Abstand aus Nah- und Fernpunkt, welche die Punkte mit dem maximal erlaubten *circle-of-confusion* (CoC) auf der Bildebene darstellen (modifiziert nach <http://www.dimagemaker.com/2007/01/15/depth-of-field-e-how-does-it-really-work/> [10.08.2008]).

in Richtung der optischen Achse. Da das Linsensystem nur jene Punkte scharf abbildet, die sich „im Fokus“ – auf der Ebene der Gegenstandsweite – befinden, wird die scharfe Abbildung als der maximal zulässige Radius des Kreises definiert, den ein Punkt außerhalb der Ebene auf der Bildebene bildet (engl. *circle-of-confusion*). Durch Verschieben des Punktes entlang der optischen Achse bis der Radius den zulässigen Grenzwert erreicht hat, können Nah- und Fernpunkt der Schärfentiefe ermittelt und somit auch ihr Betrag angegeben werden. Da mit kleinerer Blendenöffnung der auf das Aufnahmemedium treffende Lichtkegel immer spitzer wird, wird der entstehende Kreis bei identischer Verschiebung auf der optischen Achse kleiner, die erreichbare Schärfentiefe größer (vgl. Abb. 3.5).

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

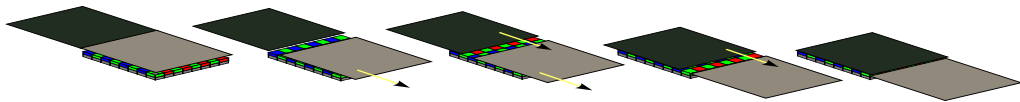


Abb. 3.6: Funktion eines Schlitzverschlusses (von links nach rechts): die zwei (dunkel- und hellgrau dargestellten) verzögert nacheinander startenden, sich gleich schnell bewegenden Jalousien ermöglichen eine konstante Belichtungszeit der einzelnen Sensorteilflächen abhängig von der Startverzögerung der zweiten Jalousie und ihrer Geschwindigkeit.



Abb. 3.7: Rolling-Shutter-Effekt bei Aufnahme einer Zugvorbeifahrt: Verzerrung schnell bewegender Objekte durch zeitlich versetztes Belichten der einzelnen Sensorpixel (Zeitversatz von oben nach unten)

Die zweite funktionale Hauptkomponente einer Kamera ist der Verschluss. Dieser verhindert im inaktiven Zustand das Auftreffen des durch das Objektiv gebündelten Lichts auf das Aufnahmemedium. Im Moment des Auslösens wird der Verschluss für eine bestimmte Zeit geöffnet („Verschlusszeit“, engl. *shutter speed*) und lässt das Licht auf das Aufnahmemedium fallen. Mechanische Verschlüsse sind als Zentral- oder Schlitzverschluss realisiert und können Verschlusszeiten von bis zu 1/500 s bzw. 1/1000 s erreichen. Bei zusätzlicher elektronischer Steuerung sind Verschlusszeiten von weniger als 1/60000 s realisierbar (Ray, 1999). Eine Besonderheit des Schlitzverschlusses ist die zeitlich nacheinander erfolgende Belichtung einzelner Flächen des Aufnahmemediums (Abb. 3.6). Dies erzeugt eine sehr schnelle Verschlusszeit für die einzelnen Bereiche des Aufnahmemediums durch eine sehr kurze Zeitverzögerung zwischen der Auslösung der ersten und zweiten Jalousie. Die Gesamtzeit zwischen der Belichtung des oberen und des untersten Bereichs des Aufnahmemediums kann jedoch deutlich länger sein. Dadurch können bei schnellen Motivbewegungen starke Verzerrungen in der Abbildung entstehen, was auch als „Rolling-Shutter-Effekt“ bezeichnet wird (Abb. 3.7).



Abb. 3.8: Aufbau und Farbschichten eines Farbfilms (modifiziert nach <http://www.elmar-baumann.de/fotografie/fotobuch/node24.html> [10.08.2008])

Die dritte funktionale Hauptkomponente ist das Aufnahmemedium, das bei einer analogen Kamera dem eingelegten Film entspricht. Im Fall eines Schwarzweiß-Filmes wird die entsprechende Stelle auf dem Film abhängig von der Anzahl der dort auftreffenden Photonen belichtet. Ein Farbfilm besteht aus unterschiedlichen Schichten, die voneinander mittels Farbfiltern getrennt sind (vgl. Abb. 3.8). Die Wellenlängenanteile des auftreffenden Lichtes werden von den jeweiligen Schichten absorbiert, so dass der Film die entsprechenden Farbinformationen speichern kann (Baumann, 2010).

Bei der Digitalkamera ist das Filmmaterial durch eine elektronische Baugruppe ersetzt. Diese besteht aus einem lichtempfindlichen Bildsensor, einem Mikroprozessor mit der zur Ansteuerung der elektronischen Funktionen notwendigen Logik und einem Massenspeichermedium (meist in Form einer wechselbaren Speicherkarte). Der lichtempfindliche Teil des Sensors besteht aus diskreten Halbleiterelementen, die in Rechteckform angeordnet sind und (Sensor-)Pixel genannt werden. Die Sensorauflösung ist durch die Anzahl der auf dem Sensor vorhandenen Pixel bestimmt. Jedes auf ein Pixel auftreffende Photon wird von einem Elektron im Halbleiterelement absorbiert, löst dieses aus seiner Bindung und bringt es auf das Leitungsband („innerer photoelektrischer Effekt“). Idealerweise ist die Empfindlichkeit des Pixels unabhängig von der Wellenlänge (der Energie) des auftreffenden Lichtes. Dann kann die Funktion des Bildsensors mit einem Schwarzweißfilm verglichen werden, der die „Photonenverteilung“ misst und somit eine Art Intensitätsverteilung speichert. Bei Farbkameras wird die Farbinformation über Farbfilter codiert, die vor der eigentlichen photosensitiven Fläche angebracht sind. Von einem spezifischen Pixel werden daher nur Photonen eines

2002). So kann die Ladung aus CCD¹-Sensoren aufgrund ihrer Bauart nur reihenweise ausgelesen werden, bevor sie über einen Ladungsverstärker in eine elektrische Spannung umgewandelt wird, während CMOS-Sensoren² bereits in jedem einzelnen Pixel die elektrische Ladung in Spannung wandeln. Die analogen Spannungen werden durch Analog/Digitalwandler in digitale Werte übersetzt und durch den Mikroprozessor mithilfe der Bildverarbeitungsrouitinen zur Herstellung der Farbinformation als ein digitales Rasterbild im Massenspeicher abgelegt.

Während analoge Videokameras aufgrund der notwendigen Mechanik zum synchronen Filmtransport stark vom Aufbau analoger Fotokameras abweichen, unterscheiden sich digitale Videokameras kaum mehr von digitalen Fotokameras; meist können auch digitale Fotokameras bereits Videos aufnehmen. Dabei erfassen diese mehrere Bilder nach dem oben beschriebenen Prinzip in einem bestimmten zeitlichen Abstand, der Aufnahmefrequenz (*framerate*). Zudem wird das erfasste Bildmaterial vor der Speicherung oft mittels spezieller Videocodecs (z. B. MPEG4, H.264) komprimiert, um redundante Information aus den aufeinanderfolgenden Bildern zu entfernen und somit den benötigten Speicherbedarf zu verringern.

¹CCD ist die Abkürzung für charge-coupled-device

²Eine weitere Halbleitertechnologie ist die CMOS (*complementary metal oxide semiconductors*)-Technik, mit der sog. APS (Active Pixel Sensoren)-Sensoren hergestellt werden.

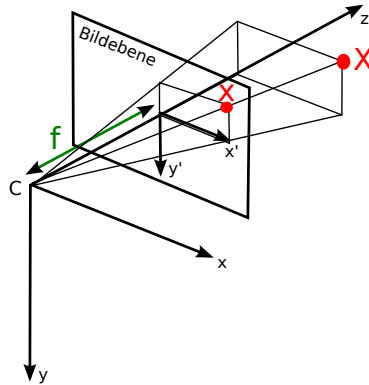


Abb. 3.10: Lochkameramodell

3.2 Kameramodellierung

3.2.1 Modellierung idealer Kameras

Grundlage für die Modellierung der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Kameras ist das Modell der Zentralprojektion: Im einfachsten Fall, der Betrachtung einer Lochkamera³, ist die Abbildung eines Punktes $\vec{X} = (x, y, z)^T$ aus dem dreidimensionalen Raum auf die zweidimensionale Bildebene eindeutig durch die Position des Projektionszentrums \vec{C} , des Kamerazentrums, definiert (Abb. 3.10). Die Bildkoordinaten des Bildpunktes $\vec{x} = (x', y')^T$ können durch Anwendung des Strahlensatzes folgendermaßen berechnet werden⁴:

$$\begin{aligned} x' &= f \cdot \frac{x}{z} \\ y' &= f \cdot \frac{y}{z} \end{aligned} \tag{3.3}$$

³Die Lochkamera ist eine Kamera ohne Linsensystem (*Camera Obscura*). Sie dient oft als mathematisches Idealmodell der Kameraabbildung.

⁴Zur Notation: Kleinbuchstaben sind skalare Größen, Großbuchstaben mit Vektorpfeil beschreiben inhomogene Spaltenvektoren im \mathbb{R}^2 , Kleinbuchstaben mit Vektorpfeil inhomogene Spaltenvektoren im \mathbb{R}^2 . Fette Großbuchstaben beschreiben homogene Spaltenvektoren im dreidimensionalen (\vec{X}), fette Kleinbuchstaben homogene Spaltenvektoren im zweidimensionalen Raum(\vec{x}). Matrizen sind durch serifenlosen Großbuchstaben gekennzeichnet (P).

Diese lineare Abbildung $\vec{X} \mapsto \vec{x}$ kann in homogenen Koordinaten als Matrixmultiplikation geschrieben werden (Hartley & Zisserman, 2004):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fx \\ fy \\ z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Dabei heißt die 3×4 Matrix, die den homogenen Punkt \mathbf{X} auf den homogenen (Bild-)Punkt \mathbf{x} abbildet, Kameraprojektionsmatrix \mathbf{P} und besitzt für die Lochkamera einen Freiheitsgrad (Parameter f). Kurz kann geschrieben werden (Hartley & Zisserman, 2004):

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{X}$$

mit

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

$$\mathbf{p}_k = (p_{1k}, p_{2k}, p_{3k})^T, k = 1, 2, 3, 4$$

und

$$\mathbf{P}^{iT} = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i4}), i = 1, 2, 3$$

Damit ist die Abbildung von \vec{X} auf \vec{x} bis auf einen von Null verschiedenen Skalierungsfaktor eindeutig bestimmt. Grund dafür ist die Skalierungsinvarianz homogener Koordinaten, da Punkte im projektiven Raum \mathbb{P}^n durch $(n + 1)$ -dimensionale Vektoren beschrieben werden (Schwarz & Scheid, 2009):

$$\mathbf{x} = (x, y, z)^T \sim \lambda(x, y, z)^T, \lambda \neq 0, \lambda \in \mathbb{R}. \quad (3.6)$$

Diese für die Lochkamera dargestellte Form der Abbildung kann auf allgemeinere Fälle der Zentralprojektion erweitert werden, indem zusätzliche Freiheitsgrade berücksichtigt werden:

- Die Kameramodellierung betrachtet nicht die optische Achse (vgl. Abb. 3.10), sondern einen auf der Bildebene senkrecht stehenden Hauptstrahl als Bezugsachse. Der Auftreffpunkt auf der Bildebene wird Bildhauptpunkt genannt. Der Ursprung des verwendeten Bildkoordinatensystems ist oft zu diesem verschoben, bei digitalen Sensoren ist beispielsweise der Ursprung in der linken oberen Ecke des Bildes. Für diese horizontale und vertikale Verschiebung werden zwei zusätzliche Parameter x_0 und y_0 eingeführt (vgl. Abb. 3.11).

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

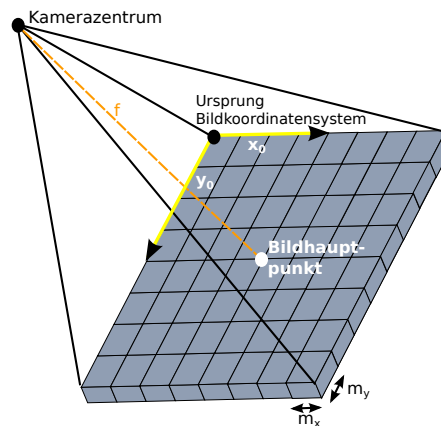


Abb. 3.11: Interne Kameraparameter: Brennweite f (bei nicht quadratischen Sensorpixeln: α_x und α_y); Ursprung des Bildkoordinatensystems und Schnittpunkt der optischen Achse sind unterschiedlich.

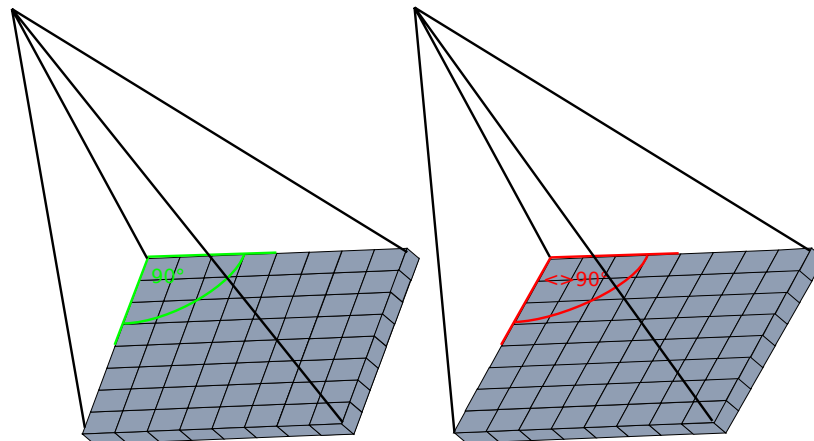


Abb. 3.12: Stehen die Achsen des Bildkoordinatensystems senkrecht zueinander, ist der Skew Parameter s Null (links); weicht der Achsenwinkel von 90° ab, ist der Skew ungleich Null (rechts).

- Das Abbildungsverhältnis f kann für die horizontale und vertikale Dimension der Bildebene unterschiedlich groß sein. Dementsprechend wird die Brennweite f mit den Faktoren m_x und m_y skaliert, so dass sich für die beiden Dimensionen die Abbildungsmaßstäbe α_x und α_y ergeben. Dies ist vor allem bei digitalen Bildsensoren relevant, die nicht quadratische Pixel haben (vgl. Abb. 3.11).
- Die Achsen der Bildebene müssen nicht senkrecht zueinander stehen. Zur Beschreibung des Achsenwinkels wird daher ein weiterer Parameter, der Skew-Parameter s eingeführt (vgl. Abb. 3.12).

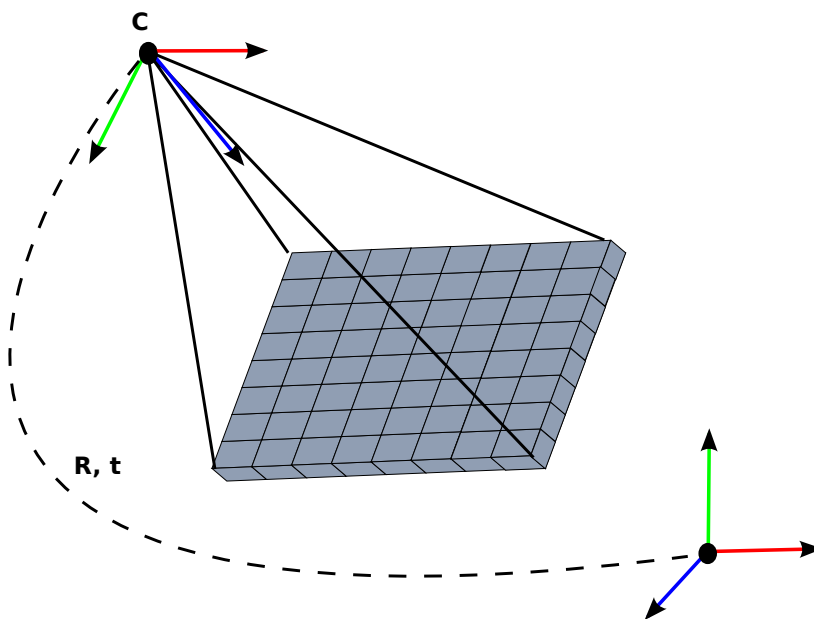


Abb. 3.13: Externe Kameraparameter: Das Kamerakoordinatensystem C ist im Bezug zum Weltkoordinatensystem mit der Rotationsmatrix R gedreht und um den Vektor t verschoben

- Orientierung und Position von Welt- und Kamerakoordinatensystem müssen nicht identisch sein. Daraus resultieren insgesamt sechs Parameter (dreimal Translation, dreimal Rotation), die in Form eines Translationsvektors t und einer Rotationsmatrix R in die Abbildungsvorschrift eingehen (vgl. Abb. 3.13).

Diese Generalisierungen ergeben 11 Parameter für die allgemeine projektive Abbildung von \mathbb{P}^3 nach \mathbb{P}^2 , die in sechs *extrinsische* Parameter, die Orientierung und Position der Kamera festlegen, und fünf *intrinsische* Parameter, die das Abbildungsverhalten beschreiben, aufgeteilt werden. Diese 11 Parameter können aus der Kameraprojektionsmatrix gewonnen werden, indem man diese in folgende Blöcke zerlegt (Hartley & Zisserman, 2004)⁵:

$$P = [M \mid \mathbf{p}_4] \quad (3.7)$$

Aus der 3×3 Matrix M kann das Kamerazentrum bestimmt werden: Wenn diese nicht singulär ist, befindet sich das Kamerazentrum C im \mathbb{R}^3 und die Kamera wird als finite Kamera bezeichnet. Der singuläre Fall beschreibt die Parallelpro-

⁵die vertikalen Querstriche innerhalb der Matrizen teilen Submatrizen bzw. Vektoren voneinander ab

jektion, bei der sich das Kamerazentrum im Unendlichen befindet (Hartley & Zisserman, 2004):

$$\mathbf{C} = \begin{cases} \text{wenn } M \text{ nicht singulär :} & \begin{pmatrix} -M^{-1}\mathbf{p}_4 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \text{wenn } M \text{ singulär :} & \begin{pmatrix} \mathbf{d} \\ 0 \end{pmatrix} \text{ mit } M\mathbf{d} = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Die Parallelprojektion vereinfacht die Bestimmung der Kameramatrix und wird deshalb als Näherung bei weit vom Objekt entfernten Kameras und gleichzeitig einer geringen Objektfeldtiefe eingesetzt (z. B. bei der Landesvermessung aus der Luft). Für die Nahbereichsphotogrammetrie und die Anwendung in der Bewegungserfassung ist dies nicht generell gegeben, daher wird diese Vereinfachung in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Das Kamerazentrum \mathbf{C} einer finiten Kamera kann im numerischen Fall durch eine Singulärwertzerlegung der Kameraprojektionsmatrix \mathbf{P} bestimmt werden, algebraisch ist es durch

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \det([p_2, p_3, p_4]) \\ -\det([p_1, p_3, p_4]) \\ \det([p_1, p_2, p_4]) \\ -\det([p_1, p_2, p_3]) \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

bestimmt (Hartley & Zisserman, 2004).

Die Kameraorientierung im Bezug zum Weltkoordinatensystem kann durch eine 3x3 Rotationsmatrix \mathbf{R} beschrieben werden, die zusammen mit der Kalibrationsmatrix \mathbf{K} in der Submatrix \mathbf{M} der Kameraprojektionsmatrix \mathbf{P} bei einer finiten Kamera folgendermassen codiert ist:

$$\mathbf{P} = [\mathbf{M} | \mathbf{p}_4] = \mathbf{K} [\mathbf{R} | -\mathbf{RC}] \quad (3.10)$$

Da die Kalibrationsmatrix \mathbf{K} eine obere Dreiecksmatrix ist und Rotationsmatrizen nach Definition orthogonale Matrizen sind, kann die Matrix \mathbf{M} mittels RQ-Zerlegung in die beiden Einzelmatrizen zerlegt werden. Dabei entfällt eine der beiden möglichen Lösungen durch die Einschränkung, dass nur Objekte vor der Bildebene abgebildet werden und daher die Skalierungsfaktoren in der Diagonalen der Kalibrationsmatrix \mathbf{K} positiv sein müssen (Hartley & Zisserman, 2004).

Die intrinsischen Kameraparameter sind in der so gewonnenen Kalibrationsmatrix \mathbf{K} wie folgt enthalten:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & x_0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Wellenoptisches Abbildungsmodell	Analytische Modelle
- Reflexion - Brechung - Beugung und Interferenz	
Geometrisch-optisches Abbildungsmodell	
- Reflexion - Brechung - ausgedehnte Öffnungen und Felder	- Gaußsche Optik - Fehlertheorie 3.Ordnung - Fehlertheorie 5.Ordnung
Paraxiales Abbildungsmodell	
- Reflexion - Brechung - im achsnahen Raum	

Abb. 3.14: Modelle der optischen Abbildung (modifiziert nach Thöniss, 2006)

Mit der Kameraprojektionsmatrix P kann das gesamte Abbildungsverhalten einer idealen Kamera beschrieben werden. Da sie im Allgemeinen nicht bekannt ist, ist die Entwicklung von Methoden zur Bestimmung der intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter ein zentraler Aufgabenbereich der Photogrammetrie (vgl. Abschnitt 3.3).

3.2.2 Modellierung realer Kameras

Die im vorigen Abschnitt aufgestellten Modellannahmen der Zentralprojektion gelten nur für eine ideale, fehlerfreie Kamera, welche die Kollinearitätsbedingung einhält. Diese besagt, dass eine Gerade durch einen Objektpunkt und das Kamerazentrum auch durch den entsprechenden Bildpunkt verläuft (Beutelspacher & Rosenbaum, 2004) und entspricht der Modellierung optischer Systeme auf Basis des paraxialen optischen Modells (Abb. 3.14: Gaußsche Optik). Dieses charakterisiert das Übertragungsverhalten eines optischen Systems alleine durch die Betrachtung des Zentralstrahles durch die optische Achse und dessen Brechung an den im Objektiv vorhandenen Linsen. Diese Annahme gilt für reale Systeme nur bei kleinen Strahlenwinkeln nahe der optischen Achse mit hinreichender Genauigkeit (Thöniss, 2006). Das Phänomen der Brechung tritt bei Medienübergängen (z. B. von Luft nach Glas) durch die Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes auf. Da der Grad der Veränderung abhängig von der Wellenlänge des Lichts ist, ist auch die Brechung, die das Verhältnis zwischen Einfall- und Ausfallwinkel des betrachteten Strahls beschreibt, abhängig von der Wellenlänge. Dieser, als Dispersion bezeichnete Effekt verursacht eine unterschiedlich starke Ablenkung verschiedenfarbiger Lichtstrahlen an einer Linse und führt dementsprechend zu farbabhängigen Brennweitenunterschieden, den sog. Farbfehlern oder chromatischen Aberrationen (Luhmann, 2010). Die chromatischen Längs- und Querfehler sind beispielhaft in Abbildung 3.15 dargestellt.

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

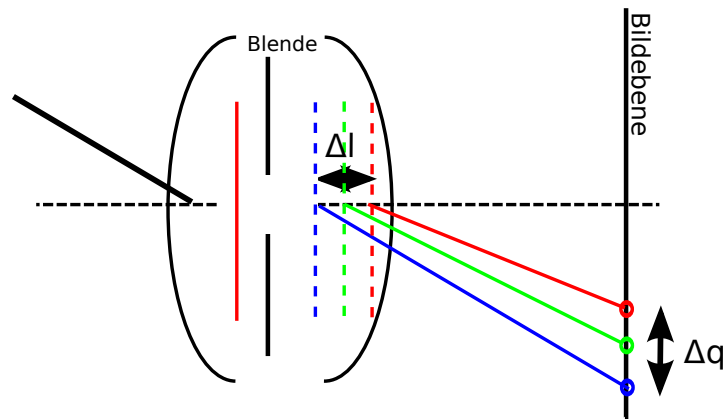


Abb. 3.15: Die Linse bricht eintreffendes Licht abhängig von seiner Wellenlänge (Dispersion). Die entstehende Positionsänderung der unterschiedlichen Schnittpunkte mit der optischen Achse wird Farblängsfehler Δl genannt. Tritt zusätzlich eine wellenlängenabhängige Veränderung des Abbildungsmaßstabes auf, erzeugt diese den Farbquerfehler Δq (modifiziert nach Luhmann, 2010 und Thöniss, 2006).

Teilweise werden solche Abweichungen bewusst in Kauf genommen, um einen möglichst großen *Field-of-View* zu erhalten, wie beispielsweise bei Fisheye-Objektiven. Meist unterscheiden sich die Objektive zudem vom in Abbildung 3.1 dargestellten, linsensymmetrischen Aufbau, sei es durch unterschiedlich große Eintritts- und Austrittspupillen (Abb. 3.16) aufgrund einer nicht zentrisch angeordneten Blende oder anderen zum Bildsensor asymmetrischen Anordnungen. Dies führt zu einer Abhängigkeit des Brechungsverhaltens von der Position und der Orientierung der in das Objektiv einfallenden Strahlen und somit zu unterschiedlichen Auftreffpunkten auf der Bildebene. Einigen dieser Abweichungen kann mit dem geometrisch-optischen Modell Rechnung getragen werden, welches die Betrachtung des Abbildungsverhaltens optischer Systeme durch die Erweiterung von einem Zentralstrahl auf über das optische System verteilte Strahlenbündel ausweitet (Abb. 3.14 Mitte).

Der Grad der Modellierung kann durch das wellenoptische Abbildungsmodell weiter verfeinert werden. Dieses berücksichtigt zusätzlich Beugungs- und Interferenzeffekte, um eine genauere Beschreibung des Übertragungsverhaltens realer optischer Systeme zu ermöglichen. Das Phänomen der Beugung tritt auf, wenn eine freie Ausbreitung der Lichtwellen gestört wird. Bei der Abbildung mittels Kameras wirken sowohl die Objektiv-einfassungen als auch die verbauten Aperturblenden (vgl. Abschnitt 3.1) begrenzend auf die Ausbreitung der Lichtwellen und führen somit zur Beugung der einfallenden Wellen. Des Weiteren kann auch die Gitterstruktur der Pixel des Bildsensors zu Beugungseffekten führen (Luhmann, 2010). Aufgrund dieser Beugungseffekte wird das von einem Punkt ausgehen-

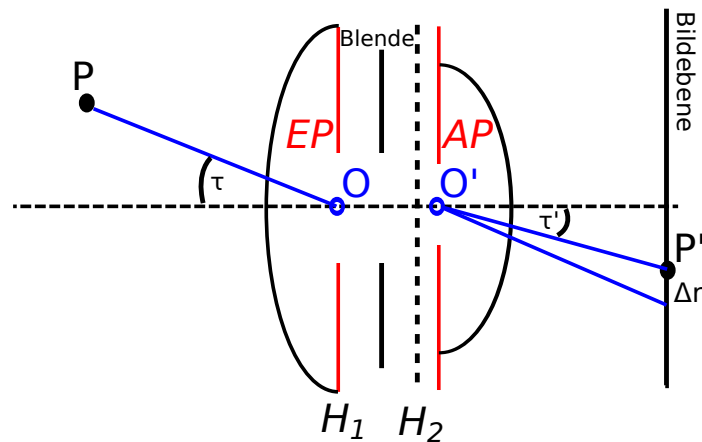


Abb. 3.16: Die Abweichung eines Objektivs vom lensensymmetrischen Aufbau führen zu unterschiedlichen Eintritts- (EP) und Austrittspupillen (AP), und damit zu einer radialsymmetrischen Verzerrung der Bildpunkte, der sog. Verzeichnung $\Delta r'$ (modifiziert nach Luhmann, 2010).

de Licht auch bei vollkommener geometrischer Fehlerfreiheit eines Objektivs mit einer runden Blende nie auf einen Punkt auf der Bildebene abgebildet, sondern es entstehen sog. Beugungsbilder⁶, eine kreisförmige Struktur (Beugungsscheibchen) mit umgebenden Ringen, deren Intensität bis zum ersten Minimum nach der Gauß-Verteilung abnimmt (Abb. 3.17 (a)). Der Radius des Beugungsscheibchens ist abhängig vom Verhältnis der Blendenöffnung zur Brennweite eines Objektivs (Ray, 1999):

$$r_{\text{airydisk}} = 1.22 \times \lambda \times \text{f-stop} \quad (3.12)$$

Der für sichtbares Licht (380-780 nm) und typische Blendenzahlen (2.7 - 14) entstehende Unschärferadius beträgt dementsprechend maximal $1.22 \times 780 \text{ nm} \times 14 = 13.322 \mu\text{m}$ (Walker, 1998). Diese Annahmen und Berechnungen gelten allerdings nur für fehlerfreie Objektive. Bei realen, aberrationsbehafteten Objektiven verändert sich die Abbildung stark (vgl. Abb. 3.17(b)).

Die *Modulation Transfer Function* (MTF) beschreibt die relative Auflösungsleistung eines optischen Systems anhand des Kontrastverhältnisses von Bild zu Objekt. Zentral ist dabei die Annahme, dass ein Bild als eine Überlagerung aller Beugungsscheibchen betrachtet werden kann, die bei der Abbildung aller Objektpunkte durch das Objektiv in der Bildebene entstehen (Ray, 1999; Trioptics GmbH, 2011). Bei der Abbildung eines durch seine Ortsfrequenz⁷ definierten Schwarz-Weiß-Streifenbildes, entsteht ein Bild, dessen Kontrast⁸ von der Auflö-

⁶engl. *Airy-Pattern*, nach ihrem Entdecker George Biddell Airy

⁷Definiert als die Anzahl der hellen und dunklen Bereiche pro Millimeter

⁸Definiert als der Helligkeitsunterschied zwischen hellen und dunklen Bereichen

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

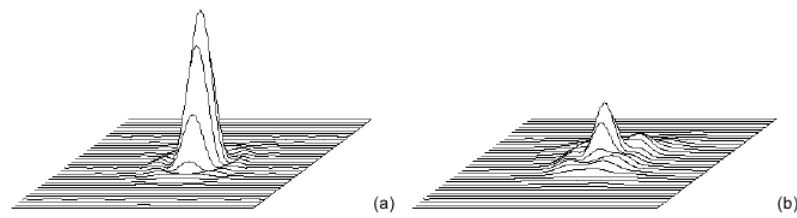


Abb. 3.17: Beugungsbild (Helligkeitsverteilung einer Punktquelle) für eine (a) ideale, beugungsbegrenzte und (b) durch eine reale, aberrationsbehaftete Abbildung (Thöniss, 2006)

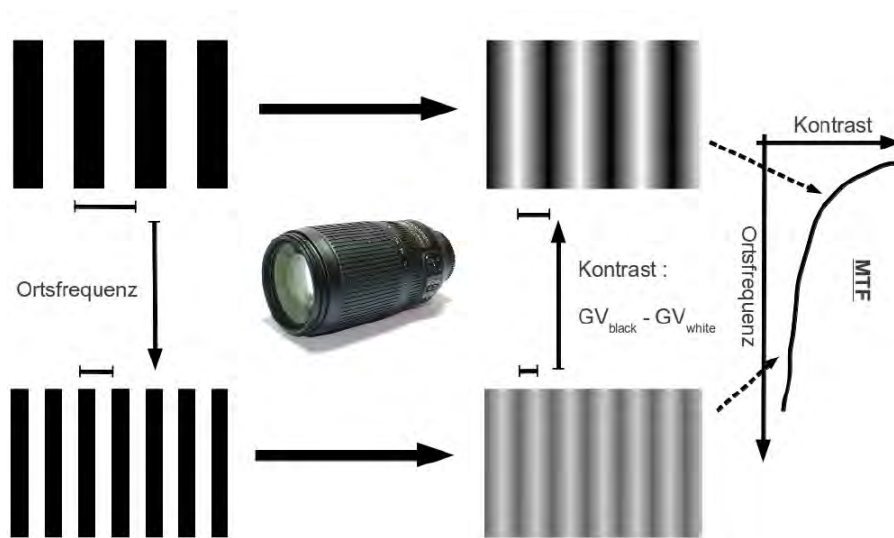


Abb. 3.18: Bestimmung der Modulation Transfer Function eines Objektivs durch die Abbildung von Streifenbildern (modifiziert nach <http://www.trioptics.com/imagemaster/images/31.jpg> [30.10.2010])

sungsleistung des Objektivs abhängt (Abb. 3.18). Durch die Variation der Ortsfrequenz kann somit die Auflösungsleistung des Objektivs bestimmt werden, die für die Ortsfrequenz Null auf 100% normalisiert wird. Mit steigender Ortsfrequenz geht die Auflösungsleistung gegen Null (Trio Optics GmbH, 2011). Dabei bezeichnet die Grenzfrequenz die Ortsfrequenz beim Nulldurchgang der Auflösungsleistung, mit anderen Worten bei der Abbildung des Streifenbildes als eine homogen helle Fläche.

Die Aufteilung in paraxiale, geometrisch-optische und wellenoptische Abbildungsmodelle erfolgt aufgrund der Vereinfachungen des zugrundeliegenden physikalischen Modells. Für die Berechnung des Abbildungsverhaltens bei der Objektivkonstruktion werden analytische Modelle verwendet, deren mathematische Ausdrücke nicht notwendigerweise die zugrundeliegenden physikalischen Effekte

beschreiben, sondern direkt deren Auswirkungen auf die Abbildung betrachten. Wurde beim paraxialen Modell die nur für sehr kleine Winkel geltende Vereinfachung angenommen, dass die Funktionswerte der Winkelfunktionen dem Winkel selbst entsprechen ($\sin\phi = \phi$), werden die Funktionswerte bei komplexeren Modellen mit einer Taylorreihenentwicklung angenähert:

$$\sin\phi = \phi - \phi^3/3! + \phi^5/5! - \phi^7/7! \dots \quad (3.13)$$

Seidel und Petzval formulierten bereits im 19. Jahrhundert die entstehenden Abbildungsfehler mathematisch unter Verwendung dieser Reihenentwicklung bis zum zweiten Glied ($\sin\phi = \phi - \phi^3/3!$) und begründeten damit die optische Fehlertheorie dritter Ordnung. Es existieren weitere Bildfehler höherer Ordnung, die jedoch einen betragsmäßig geringeren Einfluss haben und erst nach guter Korrektur der Seidelschen Abbildungsfehler sichtbar werden (Puts, 2002). Zu nennen sind beispielsweise als Fehler der fünften Ordnung der sekundäre Astigmatismus, die sekundäre sphärische Aberration oder die sekundäre Verzeichnung, die jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet werden sollen⁹.

Die von Seidel und Petzval beschriebenen Fehler lassen sich in unterschiedliche Klassen einteilen: Schärfefehler, Lagefehler und Farbfehler (Puts, 2002): Die Schärfefehler bewirken, dass sich die von einem Objekt- oder Weltpunkt ausgehenden Strahlenbündel nach der Abbildung durch eine Linse nicht in einem Bildpunkt treffen. Die dazu gehörende sphärische Aberration beschreibt die Abhängigkeit der Längsverschiebung des bildseitigen Brennpunktes vom Abstand der einfallenden Strahlen von der optischen Achse (Wirkprinzip in Abb. 3.19a). Im Gegensatz zur sphärischen Aberration, die parallel zur optischen Achse einfallende Strahlen betrachtet, charakterisiert der Astigmatismus die unterschiedliche Brennweitenänderung in vertikaler und horizontaler Richtung bei schräg in das Objektiv einfallenden Strahlen. Dadurch bilden sich statt einer gemeinsamen Bildebene je eine Bildlinie in vertikaler (meridionaler) und horizontaler (sagittaler) Richtung (Abb. 3.19b). Dies hat zur Folge, dass ein Objektpunkt nicht mehr als Kreis, sondern als Ellipse auf die Sensorebene abgebildet wird. Der dritte Schärfefehler ist die Koma, die überlagerte Effekte aus der Asymmetrie der sphärischen Aberration und des Astigmatismus bei schräg in die Linse einfallenden Strahlenbündeln beschreibt (Abb. 3.19c) und vor allem am Bildrand zu einer kometenschweifartigen Abbildung von Objektpunkten führt (Luhmann, 2010).

Die Bildfeldwölbung gehört zur Klasse der Lagefehler. Eine sphärische Linse bildet die Gegenstandsebene scharf auf eine gewölbte Bildfläche ab. Da die Sensoren der meisten Kameras annähernd ebene Flächen sind, wird diese Abbildungseigenschaft durch weitere Linsen korrigiert. Bei nicht vollständiger Kor-

⁹Detaillierte Abhandlungen finden sich unter anderem in Smith (2007), Welford (1986), Willson (1994).

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

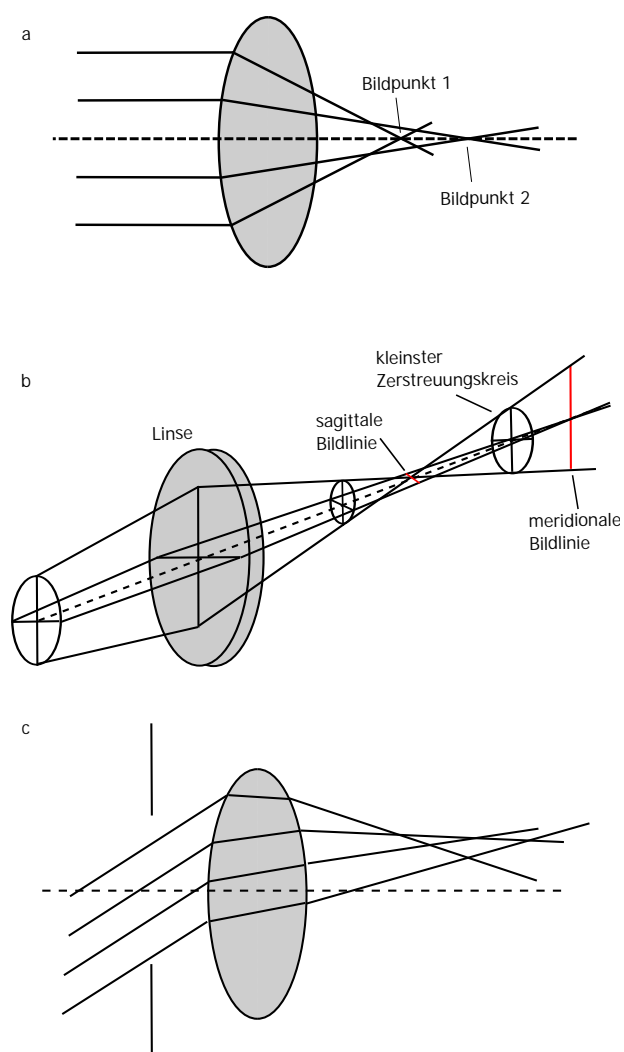


Abb. 3.19: Die monochromatischen Schärfefehler: a sphärische Aberration, b Astigmatismus, c Koma (modifiziert nach <http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/physik/18>)

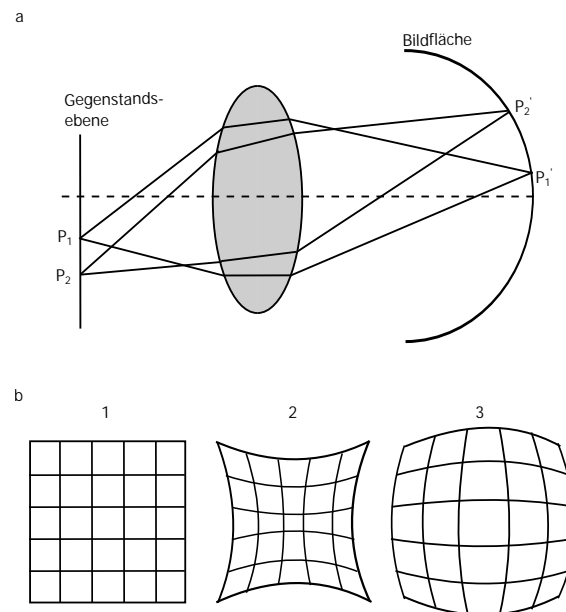


Abb. 3.20: Die monochromatischen Lagefehler: a Bildfeldwölbung, b Verzeichnung: Gegenstand wird entweder nicht (orthoskopische Abbildung, 1), kissenförmig (Abbildungsmaßstab nimmt mit Entfernung zur optischen Achse ab, 2) oder tonnenförmig (Abbildungsmaßstab nimmt mit Entfernung zur optischen Achse zu, 3) verzeichnet (modifiziert nach <http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/physik/18>).

rektur tritt bei der Projektion auf den ebenen Bildsensor eine von der Bildhöhe abhängige Veränderung der Schärfe auf (Abb. 3.20a). Ein weiterer Lagefehler ist die (radiale) Verzeichnung, welche die Veränderung des Abbildungsmaßstabs in Abhängigkeit des Abstands von der optischen Achse beschreibt (Abb. 3.20b). Bei typischen Consumer-Objektiven stellt die Verzeichnung den größten Anteil der Aberrationen. Zusätzlich sind einige weitere Fehlerarten auch vom Abstand des Bildpunktes zur optischen Achse abhängig. Daher wird in vielen photogrammetrischen Anwendungen bei der Bestimmung des Abbildungsverhaltens nicht nach den einzelnen Fehlerarten unterschieden, sondern es wird versucht, die Abweichungen vom idealen Abbildungsverhalten durch diesen einen radialsymmetrischen Korrekturterm zu beschreiben (Luhmann, 2010).

Die Farbfehler lassen sich in Farblängsfehler (chromatische Längsaberration) und Farbquerfehler (chromatische Queraberration) unterteilen (Litfin, 2005). Dabei erzeugt die Abhängigkeit des Brechverhaltens einer Linse von der Wellenlänge des Lichts einerseits unterschiedliche Bildpunkte für unterschiedliche Wellenlängen (Farblängsfehler, Abb. 3.15, Δl) und bildet andererseits die wellenlängenabhängigen Teilbilder unterschiedlich groß auf die Bildebene ab (Farbquerfehler, Abb. 3.15, Δq).

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

Bei der Entwicklung von Objektiven wird deren Abbildungsverhalten optimiert, indem die oben genannten Fehler minimiert werden. Die Art der Optimierung hängt vom späteren Einsatzbereich des Objektivs ab. Bei Objektiven, die nur in einem sehr engen Wellenlängenbereich verwendet werden, beispielsweise zur Abbildung von Laserlicht, können im Allgemeinen geringere Schärfe- und Lagefehler erreicht werden, als bei Objektiven gleicher Komplexität, die aufgrund ihrer Anwendung, beispielsweise zur Photographie, einen breiteren Wellenlängenbereich abdecken müssen. Objektiv für photogrammetrische Anwendungen werden speziell für die hohen geometrischen Genauigkeitsanforderungen im vorgesehenen Anwendungsbereich optimiert, so dass eine softwaremäßige Korrektur der meisten Seidelschen Bildfehler nicht notwendig ist (Luhmann, 2010). Die während der Produktion durchgeführte mechanische Korrektur der genannten Linsenfehler erfordert hochgenaues Schleifen, Nachbearbeiten und Positionieren der Einzellinsen im Objektiv und macht diese dementsprechend teuer. Clarke und Fryer (1998) berichten beispielsweise einen Faktor 1000 im Kaufpreis zwischen speziellen photogrammetrischen Kameras und Standard-Kameras, der zu einem beträchtlichen Teil durch die Objektivkosten verursacht wird. Zudem muss durch regelmäßige Nachkalibrierungen sichergestellt werden, dass sich das Abbildungsverhalten nicht durch Gebrauch und Transport verändert hat. Aus diesem Grund liegt es nahe, die genannten Abbildungsfehler nur bis zu einem gewissen, ökonomisch sinnvollen Teil mechanisch zu korrigieren und zusätzlich die Parameter der Fehlerfunktionen in der jeweiligen Applikation zu bestimmen. Durch die direkte Bestimmung der Abbildungsfehler während der Anwendung können Fehler vermieden werden, die durch Veränderungen des Abbildungsverhaltens über Zeit, Temperatur oder Lage hervorgerufen werden. Darüber hinaus ermöglicht es den Einsatz günstigerer Standardobjektive für Anwendungen in der Photogrammetrie sowie die Nutzung der dabei entwickelten Methoden für die Modellierung von Consumer-Kameras.

In der Photogrammetrie werden die Abweichungen im Abbildungsverhalten typischerweise nicht getrennt nach ihren physikalischen Ursachen korrigiert. Darüber hinaus werden die Auswirkungen einiger der aufgeführten Abbildungsfehler für die photogrammetrischen Anwendungen als zu gering betrachtet und es erfolgt keine Korrektur (Luhmann, 2010). Die typischerweise korrigierten Verzeichnungen lassen sich in radialsymmetrische, radialasymmetrische und tangentielle Verzeichnungen unterscheiden.

Das Symmetriezentrum der radialsymmetrischen Verzeichnungen liegt idealerweise im Bildhauptpunkt, muss allerdings nicht immer mit ihm übereinstimmen. Bei starken radialsymmetrischen Verzeichnungen wird daher ein separater Symmetriepunkt bestimmt (Godding, 2002).

Die Verzeichnungsfunktion wird in der Photogrammetrie typischerweise durch eine ungerade Potenzreihenentwicklung nach dem radialen Abstand r des abzubildenden Punktes zum Bildhauptpunkt modelliert (Luhmann, 2010):

$$\Delta r_{rad} = K_0 r + K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } r &= \sqrt{x'^2 + y'^2} \\ x' &= x - x_0 \\ y' &= y - y_0 \end{aligned}$$

Bei starken Verzeichnungen müssen die Korrekturwerte der Bildkoordinaten iterativ bestimmt werden (Luhmann, 2010). Sind die radialen Verzeichnungsterme bekannt, können die korrigierten Bildkoordinaten berechnet werden:

$$\begin{aligned} \Delta x_{rad} &= x' \frac{\Delta r_{rad}}{r} \\ \Delta y_{rad} &= y' \frac{\Delta r_{rad}}{r} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Vor allem bei von der Bauart her einfacheren Objektiven oder Objektiven mit sehr großen Brennweiten ist die Zentrierung der Linsen zum Bildsensor oft nicht ideal. Dies führt zu radialasymmetrischen und tangentialen Verzeichnungen des Abbildungsverhaltens. Brown (1971) nutzte das ursprünglich von Conrady (1919) entwickelte mathematische Modell und formulierte dies so, dass sich bei Abbruch nach dem zweiten Term ein lineares Modell für die Koeffizienten ergibt:

$$\begin{aligned} \Delta x_{tan} &= [P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy][1 + P_3r^2 + \dots] \\ \Delta y_{tan} &= [2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2)][1 + P_3r^2 + \dots] \end{aligned} \quad (3.16)$$

Die gesamte Modellierung radialsymmetrischer, radialasymmetrischer und tangentialer Verzeichnungen kann nach Brown (1971) folgendermassen beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x'(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) \\ &+ [P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy][1 + P_3r^2 + \dots] \\ \Delta y &= y'(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) \\ &+ [2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2)][1 + P_3r^2 + \dots] \end{aligned} \quad (3.17)$$

Bei Standardobjektiven – und folglich auch für den Consumer-Bereich – werden die Verzeichnungsfunktionen oft so stark vom ersten Term der Reihenentwicklung dominiert, dass sowohl die höheren Terme der radialsymmetrischen

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

Reihenentwicklung als auch die tangentialen Korrekturterme nicht mehr signifikant zur Verbesserung der Verzeichnungskorrektur beitragen und somit direkt nach der Bestimmung des ersten Terms abgebrochen werden kann (Brown, 1971). Ein Modellierungsansatz mit weiter Verbreitung vor allem in der industriellen Bildverarbeitung und Robotik ist daher die Formulierung der Verzeichnungen nach Tsai (1987) durch den ersten Term der Reihenentwicklung:

$$\begin{aligned}\Delta x &= x' K_1 r^2 \\ \Delta y &= y' K_1 r^2\end{aligned}\tag{3.18}$$

Unabhängig vom gewählten Korrekturansatz werden die durch Verzeichnungen entstehenden Abweichungen vom idealen Modell der Zentralprojektion in der in Abschnitt 3.2.1 entwickelten Kalibrationsmatrix durch sich auf den Bildhauptpunkt beziehende Korrekturterme berücksichtigt:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & x_0 + \Delta x \\ 0 & \alpha_y & y_0 + \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{3.19}$$

Durch die separate Anwendung der radialen Verzeichnungskorrektur für die Abbildung von Licht unterschiedlicher Wellenlänge kann darüber hinaus die chromatische (Quer-)Aberration korrigiert werden (Hartley & Zisserman, 2004).

Bei Zoomobjektiven, wie sie in den meisten Consumer-Kameras verbaut werden, verändern sich die Verzeichnungsparameter typischerweise sehr stark über den Brennweitenbereich (C. S. Fraser & Al-Ajlouni, 2006). Zudem sind diese Objektiv im Vergleich zu Festbrennweitenobjektiven wesentlich instabiler. So beschreiben Shortis, Bellman, Robson und Johnston (2006) einen Genauigkeitsverlust von bis zu 72% in der inneren Genauigkeit und bis zu 44% in der äußeren Genauigkeit (zitiert nach Luhmann, 2010).

Extrem-Weitwinkel und Fisheye-Objektive können mit diesen Reihenentwicklungen nicht hinreichend modelliert werden (Luhmann, 2010). Zur Modellierung solcher Objektiv schlägt Gennery (2006) ein allgemeineres Kameramodell vor, dem nicht die lineare Zentralprojektion zugrunde liegt, sondern das eine vom Strahleneinfallswinkel abhängige Position der Eintrittspupille modelliert. Damit können auch Objektiv mit einem *Field-of-View* von größer 180° modelliert werden.

3.2.3 Modellierung digitaler Kameras

Beim Einsatz digitaler Kameras treten zusätzlich zu den oben genannten Abweichungen sensorabhängige Fehler auf, von denen die wichtigsten im Folgenden genannt werden.

Die geometrischen Eigenschaften des Sensors und der abbildenden Elemente (z. B. die Mikrolinsen vor den Sensorpixeln) erzeugen ebenfalls geometrische Abbildungsfehler. Beispielhaft führt die nicht orthogonale Orientierung des Sensors zur theoretischen Bildebene zu einer Verzerrung des Bildes, die mithilfe einer zusätzlichen Affintransformation¹⁰ korrigiert werden kann (C. S. Fraser & Shortis, 1995). Bei sehr hohem Genauigkeitsgrad können die Sensorpixel auch als diskret positionierte und orientierte bildgebende Elemente betrachtet werden. Die notwendige Bestimmung der geometrischen Eigenschaften ist jedoch sehr zeitaufwändig (Luhmann, 2010).

Auch wenn keine Photonen durch das Objektiv auf den einzelnen Sensorpixeln auftreffen, führen sog. parasitäre Ladungen in den Halbleiterstrukturen des Bildsensors zu einer Registrierung von Werten ungleich Null. Diese entstehen durch das nicht ideale Verhalten der verwendeten Halbleiterelemente und erzeugen das *Bildrauschen* oder *Dunkelrauschen*, dessen Ausmaß ein Qualitätsmerkmal des Bildsensors ist. Zudem entsteht bei der Digitalisierung ein *Farbrauschen*, das aufgrund von separaten Adaptionprozeduren für die jeweiligen Farbkanäle unterschiedlich stark sein kann und somit unterschiedliche Tonwertumfänge in den Kanälen hervorrufen kann (Digital Imaging Websites Association, 2010).

Treffen mehr Photonen auf einzelne Pixel auf, als diese aufnehmen können, kommt es vor allem bei CCD-Sensoren zum Überlauf dieser Pixel auf die benachbarten (*Blooming*) oder beim zeilenweisen Auslesen zum Übersprechen auf die nächsten Zeilen (*Smear*). Darüber hinaus können *Aliasing*- und *Moiré*-Effekte durch die (räumliche) Diskretisierung in einzelne Sensorpixel und die Diskretisierung in digitale Werte bei der A/D-Wandlung entstehen (Digital Imaging Websites Association, 2010). Ein ähnliches Verhalten zeigt sich beim Einsatz von Kompressionsalgorithmen bei der Speicherung der Bilddaten.

Bei Digitalkameras beschreibt die im vorigen Abschnitt vorgestellte MTF die Passung von optischem System zum Bildsensor (vgl. Abb. 3.21, Mitte und rechts). Dabei gilt, dass die Auflösungsleistung des Objektivs mindestens der des Bildsensors entsprechen sollte, die durch die räumlichen Abstände der einzelnen Sensorpixel definiert ist¹¹ (Digital Imaging Websites Association, 2010).

¹⁰zwei Translationen und Rotationen sowie eine Maßstabsänderung je Dimension

¹¹Die maximal rekonstruierbare Ortsfrequenz des Sensors ist durch das Abtasttheorem von Nyquist und Shannon definiert, welches besagt, dass für eine Rekonstruktion mit mindestens der doppelten Frequenz der maximal im Signal vorkommenden Frequenz abgetastet werden muss.

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

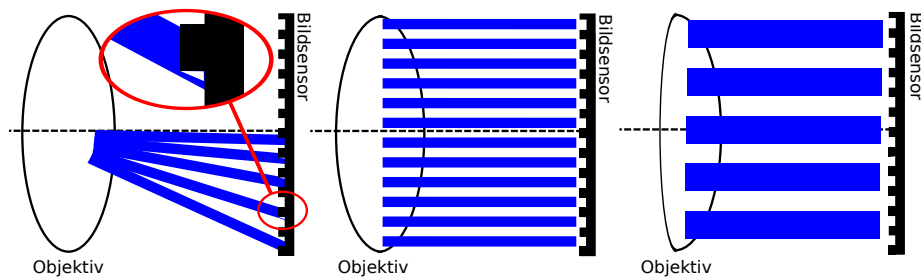


Abb. 3.21: Durch die Wandbegrenzungen der vertieft im Sensor sitzenden Pixel wird mit zunehmendem Strahlenwinkel ein Teil der einfallenden Strahlen abgeblockt (links). Der dadurch entstehende Helligkeitsabfall zum Rand des Bildes hin wird als (Pixel-)Vignettierung bezeichnet (Thöniss, 2006). Passendes (Mitte) und zu geringes (rechts) Auflösungsvermögen des Objektivs im Vergleich zur Auflösung des verwendeten Bildsensors (modifiziert nach Digital Imaging Websites Association, 2010)

Überdies kann durch die Bauform der digitalen Sensoren eine verstärkte Vignettierung des entstehenden Bildes auftreten. Dabei wird durch die Abschottung schräg auf den Bildsensor auftreffender Strahlenbündel aufgrund der Wandbegrenzung der lichtsensitiven Pixelfläche (Pixelvignettierung, vgl. Abb. 3.21) ein gleich helles Objekt abhängig von der Position auf der Bildebene mit unterschiedlicher Helligkeit abgebildet (Thöniss, 2006). Dieser Effekt kann – wie auch sein durch die Objektivkonstruktion entstehendes mechanisches Pendant – durch eine Verkleinerung der Blende verringert werden, da dadurch die Winkel der einfallenden Lichtstrahlen begrenzt werden.

Zudem führt der oft in Digitalkameras verbaute Schlitzverschluss zu Verzerrungen bei schnellen Bewegungen der Kamera oder der abgebildeten Objekte (vgl. Abschnitt 3.1). Obwohl bei einer bewegenden Kamera wesentlich größere globale Rolling-Shutter-Verzerrungen verursacht werden (Chun, Jung & Kyung, 2008), beschreiben Dapena (2009) das Problem auch bei der statischen Anwendung von CMOS-Videokameras in der Bewegungserfassung durch schnell bewegende Objekte. Da beispielsweise ein vertikal angeordneter Schlitzverschluss die Zeile 1 des Bildsensors zu einem anderen Zeitpunkt als die Zeile n belichtet, sollte ein Bild nicht als ein zu einem Zeitpunkt aufgenommener Messwert betrachtet werden, sondern es müssten die einzelnen Zeilen als einzelne Messzeitpunkte betrachtet werden. Ist dies, wie bei den meisten Auswerteprogrammen, nicht der Fall, treten von Zeitversatz pro Zeile und Geschwindigkeit der erfassten Objekte abhängige Messabweichungen auf. Können die durch eine globale Kamerabewegung entstehenden Verzerrungen für das gesamte Bild korrigiert werden (Hong, Wei & Batur, 2010), müssen die Positionskorrekturen der unabhängig bewegenden Objekte individuell auf Basis ihrer Geschwindigkeit erfolgen. Laroche und Kagami (2009) modellieren dies anhand eines dynamischen Modells und

weiten dabei die Rolling-Shutter-Verzögerung sogar über mehrere Bilder hinweg aus. Bradley, Atcheson, Ihrke und Heidrich (2009) beschreiben ein Verfahren, das durch die Aufnahme einer dunklen Szene und einen externen Blitz sowohl den Rolling-Shutter Effekt kompensieren als auch gleichzeitig mehrere Kameras synchronisieren kann. Allerdings werden dabei hohe Ansprüche an die Beleuchtung der Umgebung gestellt und die effektiven Bildraten der Aufnahmen reduziert. Eine zweite vorgestellte Methode vermeidet dies durch die Berechnung der Bewegungen einzelner Pixel anhand von *Optical Flow*-Algorithmen, anhand derer ein korrigiertes Bild neu berechnet wird. Diese Methode scheitert jedoch bei hochfrequenten Kamerabewegungen und unabhängigen Objektbewegungen, welche durch eine weitere Affintransformation korrigiert werden können (Baker, Bennett, Kang & Szeliski, 2010). Magerand und Bartoli (2010) rekonstruieren eine auf der aktuellen Belichtungszeile basierende dynamische Pose des gefilmten Objektes durch eine Modifikation der in die Projektionsgleichung eingehenden Objektposition und -rotation abhängig von einem unbekanntem Rolling-Shutter-Offset, dessen Bestimmung durch die Minimierung des Reprojektionsfehlers anhand einer nichtlinearen Optimierung erfolgt.

Aus diesen Ausführungen wird deutlich, dass vor der Wahl einer Modellierungsmethode die Abbildungseigenschaften der verwendeten Kameras überprüft werden müssen, um die bei der verwendeten Kamera entstehenden Abbildungsfehler im gewünschten Ausmaß korrigieren zu können. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Softwaremethoden zur Parameteridentifikation und zur Rekonstruktion der Objektkoordinaten die gewünschte Genauigkeit erreichen. Im nächsten Abschnitt werden einige dieser Methoden und ihre Anwendung im Rahmen der Bewegungserfassung vorgestellt.

3.3 Parameteridentifikation

Das Ziel der Parameteridentifikation ist es, alle unbekannt Parameter des gewählten Kameramodells anhand von Korrespondenzen zwischen Bildkoordinaten und Objektkoordinaten zu bestimmen. Abhängig vom Detaillierungsgrad des zugrundeliegenden Kameramodells werden dabei sowohl die Parameter der Kameraprojektionsmatrix als auch die Parameter der modellierten Abbildungsfehler ermittelt. In photogrammetrischen Anwendungen werden die internen (inklusive der Verzeichnungsparameter) und externen Kameraparameter teils in getrennten Prozessen bestimmt, da davon ausgegangen wird, dass sich die erstgenannten bei guter Kameraqualität und Objektiven mit fester Brennweite nur sehr wenig verändern, während sich die Position und Orientierung der Kamera bei jeder Aufnahme unterscheiden kann (Remondino & C. Fraser, 2006). Die Bestimmung der internen Kameraparameter bezeichnet man als (Kamera-)Kalibration, die Bestimmung der externen Parameter als Orientierung.

Bei der Betrachtung von Kamerakalibrationsmethoden ist die Laborkalibrierung von der Feldkalibrierung zu unterscheiden (Luhmann, 2010). Die erstgenannte erfolgt – getrennt von der eigentlichen Messung – im Labor und erlaubt dadurch den Einsatz präziser optischer Instrumente. Die andere wird direkt vor oder während der Messung – „im Feld“ – durchgeführt. Dabei kann sie oft nicht die absolute Genauigkeit einer Laborkalibration erreichen, erlaubt jedoch aufgrund des engen zeitlichen Bezugs zur eigentlichen Messung eine Kompensation von durch (zeitlichen) Parameterinstabilitäten hervorgerufenen Fehlern. Damit kann sie vor allem bei der Verwendung instabilerer (Consumer-)Hardware eine höhere Genauigkeit aufweisen.

Im Laufe der Zeit wurde eine Vielzahl an Parameteridentifikationsmethoden entwickelt¹², die in lineare und nichtlineare Verfahren unterteilt werden können. In der klassischen photogrammetrischen Anwendung und in den moderneren Zweischritt-Verfahren dienen die linearen Verfahren zum Schätzen guter Startwerte für die iterativen, nichtlinearen Optimierungsalgorithmen (Salvi, Armangué & Batlle, 2002). Werden Objektive mit geringer Verzerrung eingesetzt oder geringere Anforderungen an die Messgenauigkeit gestellt, werden die linearen Verfahren auch einzeln angewendet.

Die im nächsten Abschnitt vorgestellte Direkte Lineartransformation (DLT) wird in der Sportwissenschaft häufig eingesetzt. Auch die nichtlineare Erweiterung dieser Methode durch Hinzunahme von weiteren Parametern für die Verzerrungen und iterativer Lösung der Gleichungssysteme findet in der Sportwissenschaft Anwendung (Abschnitt 3.3.2). Für genauere Rekonstruktionen statischer Objekte wurde der Bündelblockausgleich (BA) entwickelt (Abschnitt 3.3.3),

¹²Für einen geschichtlichen Überblick vgl. Clarke und Fryer (1998).

der später durch die Trennung von Orientierung/Kalibrierung und eigentlicher Messung auch für die Messung sich bewegender Objekte mit Mehrkamerasystemen erweitert wurde (Abschnitt 3.3.4). Aufgrund der hohen Rechenanforderungen des Bündelblockausgleichs war dieser jedoch nicht für Echtzeitanwendungen (z. B. in der Robotik) einsetzbar. Daher wurden einige, weitere iterative Verfahren entwickelt, die alle zum Ziel hatten, die Genauigkeit gegenüber der DLT bei gleichbleibenden oder zumindest gegenüber dem BA geringeren Rechenanforderungen zu steigern (Abschnitt 3.3.5). Nach einem Überblick über diese Verfahren wird im Abschnitt 3.3.6 die Vorgehensweise zur Bestimmung der dreidimensionalen Position bei bekannter Kamerakalibration beschrieben, bevor anschließend eine Betrachtung der entstehenden Unsicherheiten bei Verwendung der genannten Verfahren erfolgt (Abschnitt 3.3.7).

3.3.1 Direkte Lineartransformation (DLT)

Die von Abdel-Aziz und Karara (1971) entwickelte und als Direkte Lineartransformation (DLT) bezeichnete Methode ermöglicht eine direkte Bestimmung des Abbildungsverhaltens der Kameras unter der Annahme eines zentralprojektiven Kameramodells. Dazu werden die Koordinaten bekannter Objektpunkte den Koordinaten bekannter Bildpunkte mit folgender Transformationsgleichung zugeordnet:

$$x_{ij} = \frac{L_{1j}X_i + L_{2j}Y_i + L_{3j}Z_i + L_{4j}}{L_{9j}X_i + L_{10j}Y_i + L_{11j}Z_i + 1}$$

$$y_{ij} = \frac{L_{5j}X_i + L_{6j}Y_i + L_{7j}Z_i + L_{8j}}{L_{9j}X_i + L_{10j}Y_i + L_{11j}Z_i + 1}$$

(3.20)

mit i : Index der Weltpunkte
 j : Index der Kamera
 X, Y, Z : Koordinaten der Weltpunkte
 x, y : Koordinaten der Bildpunkte
 L_1, \dots, L_{11} : DLT-Parameter

Dargestellt in der Normalform ergeben diese für jede Punktkorrespondenz folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{pmatrix} X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{ij}X_i & -x_{ij}Y_i & -x_{ij}Z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & -y_{ij}X_i & -y_{ij}Y_i & -y_{ij}Z_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_{1j} \\ L_{2j} \\ \dots \\ L_{11j} \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$

(3.21)

Stapelt man die für n Punktkorrespondenzen aufgestellten Gleichungen, erhält man eine $2n \times 12$ Matrix A und kann durch Lösen der Gleichung $A\mathbf{L}_j = \mathbf{0}$

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

die einzelnen DLT-Parameter bestimmen. Im fehlerfreien Fall können damit aus sechs zusammengehörigen Bild- und Objektpunkten direkt alle Parameter ermittelt werden¹³. Da sowohl die Bildpunkte als auch die Objektpunkte nicht fehlerfrei ermittelt werden können, existiert im Allgemeinen keine analytische Lösung für dieses Gleichungssystem, sondern die Lösung wird numerisch mit einem Least-Squares-Ansatz approximiert (Hartley & Zisserman, 2004).

Die im Abschnitt 3.2.1 hergeleiteten internen Parameter des zentralprojektiven Kameramodells können aus den DLT-Parametern mit folgenden Beziehungen gewonnen werden (Kwon, 1998):

$$\begin{aligned} x_0 &= L^2(L_1L_9 + L_2L_{10} + L_3L_{11}) \\ y_0 &= L^2(L_5L_9 + L_6L_{10} + L_7L_{11}) \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \sqrt{L^2(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2) - x_0^2} \\ \alpha_y &= \sqrt{L^2(L_5^2 + L_6^2 + L_7^2) - y_0^2} \end{aligned}$$

$$R = \begin{bmatrix} \frac{L(x_0L_9-L_1)}{\alpha_x} & \frac{L(y_0L_9-L_5)}{\alpha_y} & LL_9 \\ \frac{L(x_0L_{10}-L_2)}{\alpha_x} & \frac{L(y_0L_{10}-L_6)}{\alpha_y} & LL_{10} \\ \frac{L(x_0L_{11}-L_3)}{\alpha_x} & \frac{L(x_0L_{11}-L_7)}{\alpha_y} & LL_{11} \end{bmatrix}$$

$$t = - \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_4 \\ L_8 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{mit } L = -\frac{1}{\sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}}$$

Der Vorteil der Gleichung 3.21 ist ihre implizite lineare Form, die ohne Kenntnis der inneren Kameraparameter auskommt und zudem eine iterative Schätzung der Parameter vermeidet. Ein Nachteil ist die Erforderlichkeit von mindestens sechs Passpunkten, deren dreidimensionale Koordinaten bekannt sein müssen und die räumlich sehr gut verteilt sein müssen¹⁴. Dies ist vor allem bei großvolumigen Objekträumen kritisch, da die Unsicherheit der dreidimensionalen Koordinaten die Unsicherheit des ermittelten Abbildungsverhaltens beeinflusst, die in vorliegendem Fall nur durch konfigurationsspezifische, externe Validierung zu bestimmen ist (vgl. Abschnitt 2.3).

¹³rein mathematisch reichen fünf Punkte und eine Komponente des sechsten Punktes, da sechs Punkte zwölf Parameter bestimmen könnten.

¹⁴sie dürfen z. B. nicht auf einer Ebene liegen

Ein von Hatze (1988) identifizierter, weiterer Nachteil der DLT ist die vorhandene Abhängigkeit zwischen den Parametern der horizontalen und vertikalen Skalierungsfaktoren und der Brennweite, die eine nicht orthogonale Abbildung vom dreidimensionalen Objektraum in den Bildraum erzeugt. Nach Einführung einer nichtlinearen Zwangsbedingung für die Orthogonalität, die eine iterative Lösung der Gleichungen bedingt, konnte Hatze mit dieser modifizierten DLT (MDLT) eine Genauigkeitssteigerung um bis zu einer Größenordnung gegenüber der DLT erzielen. Dabei berichtete er Rekonstruktionsgenauigkeiten im Bereich von +/-1 mm, die allerdings stark von der Größe der Abweichungen der verwendeten Kameraobjektive vom idealen Modell der Zentralprojektion abhängen. Da die Objektive von Consumer-Kameras oft starke Abweichungen von diesem Modell aufweisen, ist diese lineare Form der DLT – obwohl häufig in der Sportwissenschaft aufgrund ihrer Einfachheit eingesetzt – im Allgemeinen nur für geringe Genauigkeitsanforderungen an die Messung geeignet.

3.3.2 DLT mit Verzeichnungskorrektur

Zur Korrektur auftretender Verzeichnungen und damit zur Steigerung der erreichbaren Genauigkeit der DLT, haben Marzan und Karara (1975) den ursprünglich linearen Parametersatz um nichtlineare Verzeichnungsparameter erweitert:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= \Delta x + \frac{L_{1j}X_i + L_{2j}Y_i + L_{3j}Z_i + L_{4j}}{L_{9j}X_i + L_{10j}Y_i + L_{11j}Z_i} \\ y_{ij} &= \Delta y + \frac{L_{5j}X_i + L_{6j}Y_i + L_{7j}Z_i + L_{8j}}{L_{9j}X_i + L_{10j}Y_i + L_{11j}Z_i} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Die genutzte Verzeichnungsfunktion entspricht dabei formal der in Abschnitt 3.2.2 dargestellten Funktion von Brown (1971). Die Parameter werden dabei als zusätzliche DLT-Parameter ($L_{12...16}$) in die Gleichungen aufgenommen:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x'(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}x'y' + L_{16}((x'^2 + y'^2) + 2x'^2) \\ \Delta y &= y'(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}x'y' + L_{16}((x'^2 + y'^2) + 2y'^2) \end{aligned}$$

Dabei wird der funktionale Zusammenhang der eingeführten Verzeichnungsparameter $L_9...L_{16}$ mit den zu ermittelnden DLT-Parametern $L_9...L_{11}$ deutlich. Zur Bestimmung dieser Parameter müssen daher iterative Verfahren eingesetzt werden, bei denen aus linearen Schätzwerten für die Parameter $L_9...L_{11}$ die Verzeichnungsparameter geschätzt werden und damit durch erneute Lösung die Parameter $L_{12...L_{16}}$ ermittelt werden. Abhängig von der Anzahl der berücksichtigten Verzeichnungsparameter spricht man im Gegensatz zur elfparametrischen linearen DLT11 auch von der DLT12 (mit zusätzlichem erstem Verzeichnungsterm), DLT14 (mit zusätzlichem zweitem Verzeichnungsterm) und DLT16 (mit zusätzlichem Term zur Kompensation der Dezentrierungsverzeichnung).

3.3.3 Ausgleichsverfahren

Typische Anwendungsbereiche der Photogrammetrie sind neben der Geländevermessung aus der Luft in der Geodäsie z. B. die Vermessung von Ausgrabungsstätten, von Kulturdenkmälern oder technischer Gegenstände im Maschinenbau oder nach Crash-Tests und Unfällen. Ziel ist oft die Erstellung eines dreidimensionalen (CAD-)Modells aus den einzelnen Messwerten. Da die zu vermessenden Objekte statisch sind, können bei diesen Anwendungen die notwendigen Messwerte aus nacheinander mit einer Kamera aufgenommenen Bildern bestimmt werden. Zur Erfassung aller relevanten Details werden dazu viele unterschiedliche Perspektiven des Objektes aufgenommen. Bei guter Kameraqualität ändern sich zwischen diesen Aufnahmen lediglich die Position und Rotation der Kamera, so dass bei bekannter Kalibration eine (relative) Orientierung der einzelnen Perspektiven zur Rekonstruktion der dreidimensionalen Punkte ausreicht. Diese könnte bei bekannten Passpunkten mit den in den Abschnitten 3.3.1 oder 3.3.2 beschriebenen DLT-Verfahren erfolgen. Allerdings ergäben sich so bei mehrfacher Rekonstruktion des gleichen Objektpunktes abhängig vom verwendeten Bildpaar unterschiedliche Positionen. Grund dafür sind die Abweichungen bei der Bestimmung der DLT-Parameter und der Ermittlung der Bildkoordinaten des Objektpunktes sowie die von den Objektpositionen abhängigen Rekonstruktionsabweichungen der Bildpaare, die in diesem im mathematischen Sinn überbestimmten System uneindeutige Lösungen erzeugen.

Eine Möglichkeit zur Behebung dieses Problems ist die Bestimmung von Transformationsvorschriften für die Objektkoordinaten der jeweiligen Bildpaare, mit denen alle einzeln bestimmten Objektpunkte auf gemeinsame Punkte abgebildet werden (vgl. Abb. 3.22). Dabei werden die Transformationsvorschriften im Rahmen einer Ausgleichsrechnung bestimmt, bei der die rekonstruierten Objektpunkte als Beobachtungsgleichungen eingehen. Dieses Verfahren orientiert also die Objektrekonstruktionen aus den Bildpaaren zu einer optimalen, gemeinsamen Objektrekonstruktion und wird in der Photogrammetrie (Modell-)Blockausgleich genannt (Kraus, 2004). Als Transformationsvorschrift¹⁵ wird dabei typischerweise eine (dreidimensionale) Helmert-Transformation gewählt, deren zu bestimmende Parameter neben einer Rotationsvorschrift eine Translation und ein Maßstabsfaktor sind.

Der Bündelblockausgleich (BA) erweitert diesen Ausgleichsansatz von aus Bildpaaren bestimmten Objektkoordinaten auf die Verbesserung der jeweiligen Einzelbilder (Kraus, 2004). Dem Ausgleichsansatz¹⁶ zugrunde liegt eine stochas-

¹⁵das funktionale Modell des Ausgleichs

¹⁶die Beschreibung des Ausgleichs folgt in weiten Teilen dem Skript von Navratil und Staudinger (2006), auf eine separate Quellenangabe hinter jedem inhaltlich übernommenen Satz wird im folgenden Abschnitt aus Gründen der Lesbarkeit verzichtet.

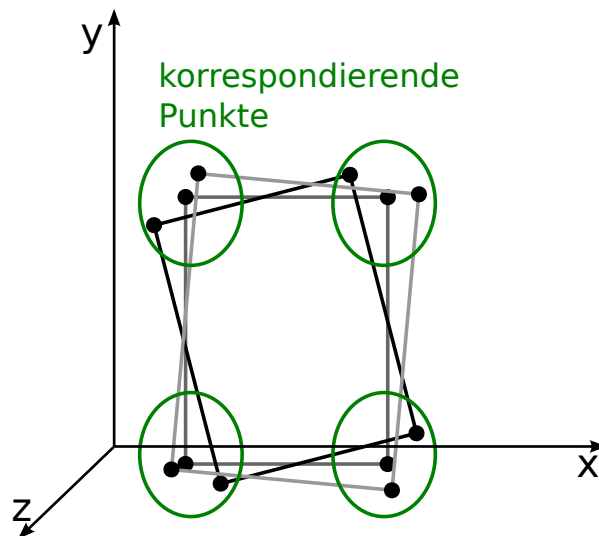


Abb. 3.22: Prinzipskizze des Modellblockausgleichs: Die ursprünglich nicht identischen Verknüpfungspunkte der einzelnen Rekonstruktionen der Bildpaare werden in einem gemeinsamen Ausgleich auf identische Punkte abgebildet.

tische Behandlung der n unsicheren Beobachtungen \mathbf{L} , deren unbekannte wahre Werte $\tilde{\mathbf{L}}$ in einem funktionalen Zusammenhang φ zu den unbekanntenen wahren Werten der s zu bestimmenden Parameter $\tilde{\mathbf{U}}$ stehen:

$$\varphi(\tilde{\mathbf{L}}, \tilde{\mathbf{U}}) = \mathbf{0} \quad (3.24)$$

Darüber hinaus geht man davon aus, dass die im Rahmen des Ausgleichs ermittelten besten Schätzer der Parameter $\hat{\mathbf{U}}$ und der Beobachtungen $\hat{\mathbf{L}}$ den funktionalen Zusammenhang ebenfalls widerspruchsfrei erfüllen:

$$\varphi(\hat{\mathbf{L}}, \hat{\mathbf{U}}) = \mathbf{0} \quad (3.25)$$

Beim Bündelblockausgleich stellen die Bildkoordinaten $x = (x, y)^T$ die Beobachtungswerte \mathbf{L} und die Kollinearitätsgleichungen das funktionale Modell φ dar:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \quad (3.26) \\ y &= y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y \end{aligned}$$

Für einen Ausgleich zwischen den erfassten Werten und den wahren Werten der Beobachtungen müssen nun Verbesserungen bestimmt werden:

$$\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{L} + \mathbf{v} \quad (3.27)$$

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

Unter Ausschluss systematischer Abweichungen der Beobachtungswerte sind diese Verbesserungen normalverteilt und folgen der Dichtefunktion Ω :

$$\Omega = \left(\prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \right) e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} v_i^2} \quad (3.28)$$

Dann liegt der beste Schätzer für die Verbesserungen am Maximum der Dichtefunktion der Verbesserungen und kann durch die Minimierung des Exponenten von Ω bestimmt werden:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} v_i^2 \mapsto \min \quad (3.29)$$

Führt man für die Kehrwerte der Varianzen $1/\sigma_i^2$ den Parameter p_i ein, so folgt in Matrixschreibweise aus Gleichung 3.29:

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \mapsto \min \text{ mit } \mathbf{P} = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_s) \quad (3.30)$$

Die Matrix \mathbf{P} ist die inverse Kovarianzmatrix der Verbesserungswerte und stellt eine Gewichtsmatrix dar, welche genaueren Beobachtungen einen höheren Stellenwert für den Ausgleich zuweist als weniger genauen.

Stellt man die Verbesserungsgleichungen für den Bündelblockausgleich auf, so ergeben sich:

$$\begin{aligned} x_{ij} + v_{x_{ij}} &= f_1(U_1, U_2, \dots, U_s) \\ y_{ij} + v_{y_{ij}} &= f_2(U_1, U_2, \dots, U_s) \end{aligned} \quad (3.31)$$

Die Wahl der unbekannt Parameter ist dabei frei; typischerweise werden neben den Orientierungsparametern (Position des Projektionszentrums $X_{0,j}, Y_{0,j}, Z_{0,j}$ und Rotation des Kamerakoordinatensystems $\omega_j, \phi_j, \kappa_j$) auch Verbesserungen der intrinsischen Parameter (Koordinaten des Bildhauptpunktes $x_{o,j}, y_{o,j}$ sowie der Kamerakonstante c_j) betrachtet (Luhmann, 2010). Diese Methode wird als selbstkalibrierender Bündelblockausgleich bezeichnet (González, Gámez, Sosa & Brito, 2007). Darüber hinaus können auch die Parameter der Objektivverzeichnungen ($K_{i,j}, P_{i,j}$, vgl. Abschnitt 3.3.2) berücksichtigt werden, so dass sich insgesamt folgende Verbesserungsgleichungen ergeben:

$$\begin{aligned} x_{ij} + v_{x_{ij}} &= f(X_i, Y_i, Z_i, X_{0,j}, Y_{0,j}, Z_{0,j}, \omega_j, \phi_j, \kappa_j, c_j, x_{o,j}, K_{1,j}, K_{2,j}, K_{3,j}, P_{1,j}, P_{2,j}) \\ y_{ij} + v_{y_{ij}} &= f(X_i, Y_i, Z_i, X_{0,j}, Y_{0,j}, Z_{0,j}, \omega_j, \phi_j, \kappa_j, c_j, y_{o,j}, K_{1,j}, K_{2,j}, K_{3,j}, P_{1,j}, P_{2,j}) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Die Anzahl der Freiheitsgrade des Ausgleichs ergibt sich dabei aus der Anzahl zur eindeutigen Lösung des Gleichungssystems notwendigen Beobachtungen n_0 und der Anzahl der Beobachtungen:

$$n_f = n - n_0 \quad (3.33)$$

Addiert man die Anzahl der unbekannt Parameter s , ergibt sich die Anzahl der aufzustellenden Bedingungsgleichungen $r = n_f + s$.

Die Ausgleichung selbst erfolgt durch die Linearisierung des nichtlinearen funktionalen Zusammenhangs von Parametern und Beobachtungswerten. Dazu werden die Kollinearitätsgleichungen durch eine Taylorreihenentwicklung mit Abbruch nach dem zweiten Glied approximiert (Gleichung 3.25). Dabei wird vorausgesetzt, dass die weiteren Terme im Vergleich zu den ersten beiden einen geringeren Einfluss auf den funktionalen Zusammenhang haben – mit anderen Worten, dass die Verbesserungswerte im Vergleich zu den Schätzwerten der Parameter klein sind. Um dies zu gewährleisten, sind gute Näherungswerte für den Parametervektor $\tilde{\mathbf{U}}$ notwendig, die z. B. anhand von Datenblättern, vorherigen Tests oder durch die DLT-Verfahren (Abschnitte 3.3.1 oder 3.3.2) gewonnen werden können. Zudem bedingt dies auch meist eine iterative Ausführung des Bündelblockausgleichs bis zur Stabilisierung der erreichten Restfehler. Die Unterschiede zwischen dem genäherten Parametervektor \mathbf{U}_0 und dem im Rahmen des Ausgleichs zu ermittelnden besten Schätzer des Parametervektors $\hat{\mathbf{U}}$ können durch den gekürzten Parametervektor \mathbf{u} ausgedrückt werden:

$$\mathbf{u} = \hat{\mathbf{U}} - \mathbf{U}_0 \quad (3.34)$$

Wendet man den funktionalen Zusammenhang φ auf die Beobachtungen \mathbf{L} und den genäherten Parametervektor \mathbf{U}_0 an, ergibt sich ein Widerspruchsvektor \mathbf{w} :

$$\varphi(\mathbf{L}, \mathbf{U}_0) = \mathbf{w} \quad (3.35)$$

Der gekürzte Beobachtungsvektor \mathbf{l} beschreibt dabei die Differenz aus den Beobachtungen \mathbf{L} und einem genäherten Beobachtungsvektor \mathbf{L}_0 , so dass sich kein Widerspruch in den funktionalen Beziehungen $\varphi(\mathbf{L}_0, \mathbf{U}_0)$ ergibt:

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{L}_0, \mathbf{U}_0) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{l} &= \mathbf{L} - \mathbf{L}_0 \end{aligned} \quad (3.36)$$

Die Taylorreihenentwicklung bis zur ersten partiellen Ableitung lautet demnach:

$$\begin{aligned} \varphi(\hat{\mathbf{L}}, \hat{\mathbf{U}}) &= \varphi(\mathbf{L}, \mathbf{U}_0) + \\ &+ \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{U}_1} (\hat{U}_1 - U_{0_1}) + \dots + \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{U}_s} (\hat{U}_s - U_{0_s}) + \\ &+ \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{L}_1} (\hat{L}_1 - L_1) + \dots + \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{L}_n} (\hat{L}_n - L_n) + \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$(3.38)$$

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

Die partiellen Ableitungen der einzelnen Zusammenhänge $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_r)$ können nun in zwei Matrizen zusammengefasst werden. Die erste Matrix beinhaltet alle Ableitungen nach den unbekanntem Parametern und wird Modellmatrix A genannt. Die zweite Matrix B besteht aus den Ableitungen nach den Beobachtungen:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial \hat{U}_1} \right) & \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial \hat{U}_2} \right) & \dots & \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial \hat{U}_s} \right) \\ \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial \hat{U}_1} \right) & \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial \hat{U}_2} \right) & \dots & \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial \hat{U}_s} \right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial \varphi_r}{\partial \hat{U}_1} \right) & \left(\frac{\partial \varphi_r}{\partial \hat{U}_2} \right) & (\dots) & \left(\frac{\partial \varphi_r}{\partial \hat{U}_s} \right) \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial L_1} \right) & \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial L_2} \right) & \dots & \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial L_n} \right) \\ \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial L_1} \right) & \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial L_2} \right) & \dots & \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial L_n} \right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial \varphi_r}{\partial L_1} \right) & \left(\frac{\partial \varphi_r}{\partial L_2} \right) & (\dots) & \left(\frac{\partial \varphi_r}{\partial L_n} \right) \end{pmatrix} \quad (3.40)$$

Die partiellen Ableitungen der Kollinearitätsgleichungen nach den Beobachtungen und den Parametern sind in Anhang A.3 dargestellt. Mit diesen kann die Matrix B für die Schätzwerte \mathbf{L} und \mathbf{U}_0 gefüllt werden.

Für das funktionale Modell nach Gleichung 3.25 kann man nun schreiben:

$$\mathbf{A}\mathbf{u} + \mathbf{B}\mathbf{v} + \mathbf{w} = \mathbf{0} \quad (3.41)$$

Nimmt man zusätzlich zur Minimalitätsforderung aus Gleichung 3.30 die Bedingungen für das funktionale Modell aus Gleichung 3.41 ergibt sich mathematisch ein Extremwertproblem mit Nebenbedingungen, das unter Nutzung der Lagrangeschen Multiplikatoren (mit $\lambda = 2\mathbf{k}$) folgendermassen formuliert werden kann:

$$F(\mathbf{v}, \mathbf{u}) = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} - 2\mathbf{k}(\mathbf{A}\mathbf{u} + \mathbf{B}\mathbf{v} + \mathbf{w}) \mapsto \min \quad (3.42)$$

Zur Bestimmung des Minimums werden die partiellen Ableitungen nach \mathbf{v} und \mathbf{u} gebildet und nullgesetzt:

$$\frac{\partial F}{\partial \mathbf{v}} = 2\mathbf{v}^T \mathbf{P} - 2\mathbf{k}^T \mathbf{B} = \mathbf{0} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{A}^T \mathbf{k} = \mathbf{0} \quad (3.44)$$

Nach Einsetzen von Gleichung 3.43 in 3.41 kann folgendes Gleichungssystem aufgestellt werden:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{k} \\ \mathbf{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{w} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

Dieses Gleichungssystem kann im regulären Fall durch die Inverse gelöst werden. Nach Einsetzen von \mathbf{k} in Gleichung 3.43 kann auch \mathbf{v} bestimmt werden. Aus den ermittelten Größen \mathbf{u} und \mathbf{v} können die verbesserten Vektoren für die Parameter $\hat{\mathbf{U}}$ und die Beobachtungen $\hat{\mathbf{L}}$ berechnet werden. Wichtig ist jedoch eine Überprüfung der Berechnungen aufgrund der Linearisierungsfehler bei zugrundeliegenden nichtlinearen Funktionsbeziehungen φ . Dazu wird der Erfüllungsgrad des funktionalen Modells überprüft (vgl. Gleichung 3.25), welcher sich im Bereich der Rechengenauigkeit des verwendeten PCs bewegen sollte:

$$e = \varphi(\hat{\mathbf{L}}, \hat{\mathbf{U}}) \quad (3.46)$$

Ist dies nicht der Fall, so sollten die ermittelten Verbesserungswerte als neue Schätzwerte der Parameter eingesetzt werden und weitere iterative Ausgleichungen durchgeführt werden, bis die Genauigkeit erfüllt ist.

Mit der beschriebenen Vorgehensweise erreicht der Bündelblockausgleich im Vergleich zu anderen Methoden höhere Genauigkeiten, unter anderem auch da keine separaten Kalibrationsmessungen notwendig sind, sondern die Aufnahme der Kalibrationsinformationen zeitgleich zur eigentlichen Messung erfolgt (Grün, 1997). Damit können Veränderungen der Kameraparameter zwischen Kalibrierung und Messung ausgeschlossen werden. Im Allgemeinen müssen für die Anwendung des Bündelblockausgleichs – im Gegensatz zur DLT – keine, vor allem bei großvolumigen Kalibrierobjekten möglicherweise die Genauigkeit limitierenden Koordinaten der Passpunkte bekannt sein, allerdings stellt die Methode höhere Anforderungen an die relative Position und Orientierung der einzelnen Bildaufnahmen, die als Aufnahmekonfiguration bezeichnet wird. Die Bestimmung optimaler Aufnahmekonfigurationen wird vielfach in der Literatur behandelt. Generell wirken sich Aufnahmen mit stark konvergierenden Orientierungen, positionsgleiche Aufnahmen mit verschiedenen Rotationen der Kameras um die optische Achse sowie aus vielen unterschiedlichen Distanzen zum Objekt günstig auf den Bündelblockausgleich aus (Luhmann, 2010). Da sich diese Konfigurationen teils nicht mit für die spezifische Objektmessungen sinnvollen Aufnahmekonfigurationen decken, sollte in solchen Fällen auf die Möglichkeit der Selbstkalibration verzichtet werden (Remondino & C. Fraser, 2006). Wie bereits erwähnt, müssen jedoch zur Approximation des nichtlinearen Abbildungsverhaltens der Kollinearitätsgleichungen für die numerische Lösung gute Näherungswerte bekannt sein, die z. B. aus Herstellerdatenblättern und Validierungsmessungen entnommen oder in einem linearen Schritt, z. B. mit den DLT-Verfahren (Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2) berechnet werden können.

3.3.4 Bündelblockausgleich in der Bewegungserfassung

Grundsätzlich können unterschiedliche Perspektiven zur dreidimensionalen Rekonstruktion eines Objektes nur mit einer Kamera zeitlich nacheinander aufgenommen werden, wenn sich das zu rekonstruierende Messobjekt während der Aufnahmen nicht verändert. Bei bewegten Objekten müssen daher die unterschiedlichen Bilder zeitgleich erfasst werden, um eine korrespondierende Position und Orientierung des bewegten Objektes aus allen Perspektiven zu gewährleisten. Dementsprechend sind für diese Art der Erfassung mehrere, synchronisierte Kameras notwendig (vgl. auch Abschnitt 2.2), deren Position und Orientierung typischerweise während der Aufnahme fest bleibt. Variierende Aufnahme-konfigurationen, wie für den oben beschriebenen Ansatz des selbstkalibrierenden Bündelblockausgleichs notwendig, sind daher nicht zielführend.

Die Lösung schafft die Einführung einer separaten Kalibrierungsmessung, bei der ein bekanntes Objekt im Aufnahmevervolumen bewegt wird. Dies stellt die Umkehrung des oben dargestellten Prinzips der variierenden Aufnahme-konfigurationen dar. Ein Beispiel ist die von Maas (1999) beschriebene „Moved Reference Bar“-Methode, bei der ein Stab mit bekannter Länge im Aufnahmevervolumen des Mehrkameranensystems zufällig bewegt wird. Die Positionen der Stabenden in jedem erfassten Bild aller Kameras stellen dabei eine Beobachtungsgleichung für den selbstkalibrierenden Bündelblockausgleich dar (Luhmann, 2010). Wird die bekannte Länge des Stabes als zusätzlicher Parameter aufgenommen, erlaubt diese Methode die vollständige Kalibrierung eines synchronisierten Mehrkameranensystems mit hoher Genauigkeit und ohne die Notwendigkeit von Referenzrahmen (vgl. Abschnitt 2.3) und wird in ähnlicher Form in vielen der kommerziellen Passivmarker-Infrarot-Systeme eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.1). Die Orientierung des Laborkoordinatensystems erfolgt nach der Kalibrierung durch ein kleines und dadurch mit geringen Toleranzen zu fertigendes Referenzobjekt.

Eine im Bezug auf die Gewinnung der Bildkoordinaten noch robustere Methode stellen Svoboda u. a. (2005) vor. Dabei wird lediglich das Leuchtbild eines modifizierten Laserpointers genutzt. Können im allgemeinen Fall aus diesen Daten lediglich Orientierung und Verzeichnungsparameter der Kameras ermittelt werden, nutzen Svoboda u. a. (2005) die bei Verwendung von mehr als drei Kameras entstehenden Zwangsbedingungen zur Erzeugung eines virtuellen Kalibrierobjektes, anhand dessen ein selbstkalibrierender Bündelblockausgleich die Kameraparameter bis auf einen unbekanntem Skalierungsfaktor ermitteln kann. Dieser Skalierungsfaktor wird nachträglich durch ein statisches Referenzobjekt bestimmt, das gleichzeitig auch die Orientierung des Laborkoordinatensystems festlegt. Wichtig bei allen diesen Verfahren ist aufgrund der bewegenden Objekte die exakt synchrone Erfassung der Bilder aller Kameras.

3.3.5 Weitere iterative Verfahren

In den letzten Jahrzehnten wurden eine Fülle weiterer, mehrstufiger Verfahren zur Kamerakalibrierung und -orientierung entwickelt, von denen die meisten in einem ersten Schritt lineare Schätzwerte der Parameter bestimmen, die in einem weiteren Schritt (iterativ) verfeinert werden. Durch die immer größere Rechenleistung (mobiler) Computer wird die Bildmessung immer stärker in der Robotik und dem maschinellen Sehen genutzt und macht damit auch echtzeitfähige Verfahren notwendig. Da dies mit dem o.g. Bündelblockausgleich aufgrund der Vielzahl der Beobachtungsgleichungen nicht möglich war, wurde nach Vereinfachungen gesucht, die einen Echtzeiteinsatz ermöglichen. Die meisten Methoden basieren auf Ansätzen aus den Kollinearitätsgleichungen und unterscheiden sich in der Anzahl der zusätzlichen Parameter zur Modellierung von Verzeichnungseffekten, den gewählten Zwangsbedingungen, den notwendigen Kalibrierobjekten oder der Wahl der numerischen Lösungsverfahren. Ziel ist oft die Reduktion der beim klassischen Bündelblockausgleich zu bestimmenden Unbekannten, um den Rechenaufwand zu verringern oder um robustere Methoden zu erhalten. Bekannt geworden ist die Methode nach Tsai (1987), die nur radialsymmetrische Verzeichnungen bis zum ersten Term korrigiert und die in einem ersten linearen Schritt geschätzten Kameraparameter in einem zweiten Schritt durch die Minimierung des resultierenden Fehlers in den Bildkoordinaten mit nichtlinearen Verfahren optimiert (Horn, 2000). Ein weiteres bekanntes Verfahren wurde von Heikkilä (2000) ursprünglich für die Kalibrierung mit kreisförmigen Flächenmarkern (vgl. Abschnitt 4.2) entwickelt. Auch er approximiert in einem ersten Schritt das Abbildungsverhalten linear ohne die Objektivverzeichnungen zu berücksichtigen und erweitert in einem zweiten, iterativen Schritt die Bestimmung auf ein Least-Squares-Verfahren, in das die einzelnen Parameter und Beobachtungen abhängig von ihrer Güte unterschiedlich stark gewichtet eingehen. Darüber hinaus sind besonders in den letzten Jahren Verfahren auf Basis der projektiven Geometrie bekannt geworden (u.a. Pollefeys, Koch & van Gool, 1999; Triggs, 1997).

3.3.6 Dreidimensionale Positionsmessung

Oft werden die Objektkoordinaten nicht direkt im gemeinsamen Bündelblockausgleich bestimmt, sondern die Bewegungs- oder Positionsmessung erfolgt unabhängig von der Kalibration und Orientierung des Kamerasystems. Dazu wird das Verfahren des räumlichen Vorwärtsschnitts angewendet, welches für die Betrachtung der aus den Unsicherheiten der Modellparameter entstehenden Messunsicherheiten des rekonstruierten Objektpunktes relevant ist und im Folgenden beschrieben wird.

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

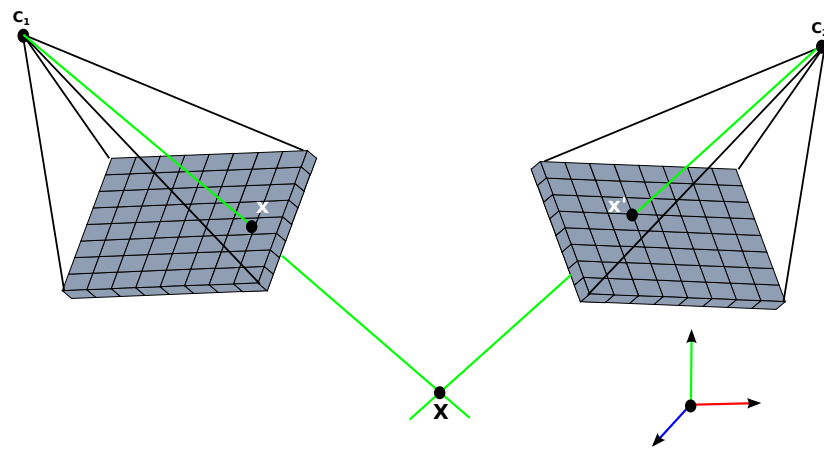


Abb. 3.23: Prinzip des räumlichen Vorwärtsschnitts: Rekonstruktion des Weltpunktes \mathbf{X} anhand des Schnittpunkts der Geraden von den (bekannten) Kamerazentren C_1 und C_2 aus durch die jeweiligen Bildpunkte \mathbf{x} und \mathbf{x}'

Bei der Abbildung auf die Bildebene einer Kamera geht die Tiefeninformation des abgebildeten Weltpunktes verloren¹⁷. Ist jedoch die Kameramatrix P einer Kamera bekannt, kann im fehlerfreien Fall aus den Koordinaten eines Bildpunktes \mathbf{x} die Gerade im dreidimensionalen Raum \mathbb{R}^3 ermittelt werden, auf der der gesuchte Weltpunkt \mathbf{X} liegt. Die Koordinaten des Weltpunktes können dabei als Funktion eines einzelnen Parameters, der Tiefe μ , ausgedrückt werden (Hartley & Zisserman, 2004), wobei \mathbf{p}_4 die vierte Spalte der Kameraprojektionsmatrix P ist (vgl. Gleichung 3.5):

$$\mathbf{X}(\mu) = \begin{pmatrix} M^{-1}(\mu \mathbf{x} - \mathbf{p}_4) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.47)$$

Ist eine weitere, von P unterschiedliche Kamera¹⁸ P' vorhanden, die den Weltpunkt \mathbf{X} auf einen Bildpunkt \mathbf{x}' abbildet, ergibt sich unter Verwendung der Formel 3.47 eine weitere Gerade (vgl. Abb. 3.23).

¹⁷Die relativen Größenverhältnisse der Objektradien können allerdings zur Schätzung der relativen Tiefe herangezogen werden (vgl. Hartley und Zisserman, 2004).

¹⁸Dabei muss es sich nicht um eine physikalisch andere Kamera handeln, es genügt, wenn die Projektionsmatrizen – z. B. durch abweichende Kameraorientierung – verschieden sind.

Zur Bestimmung des Schnittpunkts werden die Projektionsgleichungen aufgestellt; durch Bildung des Kreuzprodukts können die homogenen Skalierungsfaktoren eliminiert werden:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{P}\mathbf{X} \\ \mathbf{x}' &= \mathbf{P}'\mathbf{X} \end{aligned} \tag{3.48}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x} \times (\mathbf{P}\mathbf{X}) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{x}' \times (\mathbf{P}'\mathbf{X}) &= \mathbf{0} \end{aligned}$$

Ausgeschrieben ergeben diese Gleichungen jeweils drei lineare Gleichungen, von denen die ersten beiden linear unabhängig sind (Hartley & Zisserman, 2004):

$$\begin{aligned} x(\mathbf{p}^{3T}\mathbf{X}) - \mathbf{p}^{1T}\mathbf{X} &= 0 \\ y(\mathbf{p}^{3T}\mathbf{X}) - \mathbf{p}^{2T}\mathbf{X} &= 0 \\ x(\mathbf{p}^{2T}\mathbf{X}) - y(\mathbf{p}^{1T}\mathbf{X}) &= 0 \end{aligned} \tag{3.49}$$

$$\begin{aligned} x'(\mathbf{p}'^{3T}\mathbf{X}) - \mathbf{p}'^{1T}\mathbf{X} &= 0 \\ y'(\mathbf{p}'^{3T}\mathbf{X}) - \mathbf{p}'^{2T}\mathbf{X} &= 0 \\ x'(\mathbf{p}'^{2T}\mathbf{X}) - y'(\mathbf{p}'^{1T}\mathbf{X}) &= 0 \end{aligned}$$

Die Kombination der jeweils ersten zwei Gleichungen in die Form $\mathbf{A}\mathbf{X} = 0$ ergibt für A:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} xp^{3T} - p^{1T} \\ yp^{3T} - p^{2T} \\ x'p'^{3T} - p'^{1T} \\ y'p'^{3T} - p'^{2T} \end{bmatrix} \tag{3.50}$$

Dieses Gleichungssystem ergibt vier Gleichungen zur Lösung der vier homogenen Unbekannten. Aufgrund der Unbestimmtheit der Skalierung bei homogenen Koordinaten ist das Gleichungssystem überbestimmt. Dieses Verfahren bildet das grundlegende Prinzip zur Rekonstruktion dreidimensionaler Objektpunkte aus Bildpunkten zweier ideal zentralprojektiver Kameras mit bekannten Kameramatrizen.

Sobald Ungenauigkeiten in den Kameraparametern oder den ermittelten Bildkoordinaten vorhanden sind, schneiden sich die Geraden im Allgemeinen nicht mehr in einem Punkt, sondern stehen windschief zueinander. Eine analytische Möglichkeit zur Bestimmung des Objektpunktes ist die Bestimmung des minimalen Abstandes der Geraden. Auf der Hälfte der entstehenden Strecke könnte ein Schätzer des Objektpunktes liegen. Dabei wird durch die Betrachtung im Objektraum der entstehende Reprojektionsfehler minimiert. Zur numerischen Bestimmung der Lösung kann dabei die Methode der Einzelwertzerlegung herangezogen werden (Hartley & Zisserman, 2004).

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

Eine Lösungsmöglichkeit bei bekannten DLT-Parametern bietet die Umstellung der Transformationsgleichung in folgende Form:

$$\begin{bmatrix} L_1 - L_9(x - \Delta x) & L_2 - L_{10}(x - \Delta x) & L_3 - L_{11}(x - \Delta x) \\ L_5 - L_9(y - \Delta y) & L_6 - L_{10}(y - \Delta y) & L_7 - L_{11}(y - \Delta y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x - \Delta x) - L_4 \\ (y - \Delta y) - L_8 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Sind im Rahmen der Kalibration zusätzlich Objektivverzeichnungen bestimmt worden, können dabei die bereits verzeichnungskorrigierten Bildkoordinaten $x - \Delta x$ verwendet werden. Sind die für den zu bestimmenden Objektpunkt korrespondierenden Bildpunkte in j Kameras bekannt, kann die o.g. Gleichung gestapelt und für $j \geq 2$ Kameras im Least-Squares-Verfahren gelöst werden:

$$\begin{bmatrix} L_1^{(1)} - L_9^{(1)}(x^{(1)} - \Delta x^{(1)}) & L_2^{(1)} - L_{10}^{(1)}(x^{(1)} - \Delta x^{(1)}) & L_3^{(1)} - L_{11}^{(1)}(x^{(1)} - \Delta x^{(1)}) \\ L_5^{(1)} - L_9^{(1)}(y^{(1)} - \Delta y^{(1)}) & L_6^{(1)} - L_{10}^{(1)}(y^{(1)} - \Delta y^{(1)}) & L_7^{(1)} - L_{11}^{(1)}(y^{(1)} - \Delta y^{(1)}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_1^{(j)} - L_9^{(j)}(x^{(j)} - \Delta x^{(j)}) & L_2^{(j)} - L_{10}^{(j)}(x^{(j)} - \Delta x^{(j)}) & L_3^{(j)} - L_{11}^{(j)}(x^{(j)} - \Delta x^{(j)}) \\ L_5^{(j)} - L_9^{(j)}(y^{(j)} - \Delta y^{(j)}) & L_6^{(j)} - L_{10}^{(j)}(y^{(j)} - \Delta y^{(j)}) & L_7^{(j)} - L_{11}^{(j)}(y^{(j)} - \Delta y^{(j)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x^{(1)} - \Delta x^{(1)}) - L_4^{(1)} \\ (y^{(1)} - \Delta y^{(1)}) - L_8^{(1)} \\ \vdots \\ (x^{(j)} - \Delta x^{(j)}) - L_4^{(j)} \\ (y^{(j)} - \Delta y^{(j)}) - L_8^{(j)} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

3.3.7 Unsicherheitsbetrachtung

Bei der Betrachtung von Messunsicherheiten im Zusammenhang mit der Kameramodellierung und Parameteridentifikation muss zwischen den Abweichungen vom zugrunde gelegten Kameramodell (Modellabweichungen) und den dadurch entstehenden Messabweichungen im dreidimensionalen Raum unterschieden werden. Beispielsweise können die Modellabweichungen bei der DLT ermittelt werden, indem die Transformationsgleichung 3.23 so umgestellt wird, dass die Differenz aus den gemessenen Bildkoordinaten und den durch die DLT auf die Bildebene projizierten Passpunktkoordinaten des i -ten Punktes berechnet werden kann:

$$\begin{aligned} e_{x_i} &= (x_i - \Delta x_i) - \frac{L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i + L_4}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1} \\ e_{y_i} &= (y_i - \Delta y_i) - \frac{L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i + L_8}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1} \end{aligned} \quad (3.53)$$

Die mittlere, absolute Kalibrationsabweichung (*RMS-Fehler*) ergibt sich durch die Summenbildung der Fehlerquadrate über alle Passpunkte:

$$e_K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{e_{x_i}^2 + e_{y_i}^2} \quad (3.54)$$

Schon die Einheit Pixel macht die relative Natur dieser Grösse deutlich. Zwar kann dieses Maß der internen Genauigkeit über die Güte der Wahl des Kameramodells oder eventueller Verzeichnungskorrekturen Auskunft geben, zur Angabe einer (metrischen) Messunsicherheit sind jedoch übergeordnete, externe Referenzmessungen notwendig (Luhmann, 2010). Die Bestimmung eines Rekonstruktionsfehlers anhand einer Reprojektion der ermittelten Bildkoordinaten in den Objektraum und Positionsbestimmung der Passpunkte (vgl. Abschnitt 3.3.6) birgt die Gefahr einer abweichenden Rekonstruktionsgenauigkeit an nichtkalibrierten Positionen aufgrund einer möglichen Überanpassung der DLT-Parameter auf die verwendeten Passpunkte. Um dies auszuschließen, schlagen Allard, Stokes und Bianchi (1995) eine Bestimmung der Rekonstruktionsabweichung anhand nicht zur Kalibration genutzter Passpunkte $\mathbf{X}_i^{(P)} = (X_i^{(P)}, Y_i^{(P)}, Z_i^{(P)})$ vor. Nach der Rekonstruktion dieser Passpunkte $\mathbf{X}_i^{(R)} = (X_i^{(R)}, Y_i^{(R)}, Z_i^{(R)})$ kann eine mittlere, absolute Abweichung in der Einheit der Objektkoordinaten wie folgt berechnet werden:

$$e_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(X_i^{(R)} - X_i^{(P)})^2 + (Y_i^{(R)} - Y_i^{(P)})^2 + (Z_i^{(R)} - Z_i^{(P)})^2} \quad (3.55)$$

Bei guter Verteilung der Passpunkte über das Messvolumen kann man davon ausgehen, dass die ermittelte Abweichung der mittleren Abweichung der Rekonstruktion im Messvolumen entspricht. Damit kann dieses Vorgehen als praxistaugliche Möglichkeit zur Messgenauigkeitsabschätzung für Zweikerasysteme angesehen werden¹⁹. Wie jedoch in Abbildung 3.24 ersichtlich, können dabei – zumindest mit vorhandener Software und ohne zusätzliche Maßnahmen – keine systematischen Abweichungen in den Passpunktkoordinaten detektiert werden (vgl. auch Abschnitt 2.3).

Grün (1994) fordert jedoch neben einer generell hohen Präzision und Reliabilität für photogrammetrische Systeme die Möglichkeit der Selbstdiagnose durch eine (automatisierte) Qualitätskontrolle von Messung und Ergebnis und leitet daraus u. a. auch die Forderung nach redundanten Systemen mit mehr als zwei Kameras ab. Ideal wäre eine Vorhersage der resultierenden Messunsicherheit bereits auf Basis der ermittelten Unsicherheiten der Eingangsgrößen. Bei diesen Mehrkerasystemen entsteht jedoch die Problematik, dass bei der Rekonstruktion der Objektpunkte je nach den am Least-Squares-Ausgleich beteiligten Kameras unterschiedliche Messunsicherheiten auftreten und somit unterschiedliche Koordinaten erzeugt werden (vgl. Abschnitt 3.3.3). Dies tritt in der Bewegungserfassung besonders häufig aufgrund der temporären Verdeckung von Markern (Objektpunkten) durch andere Körpersegmente in einzelnen Kameras auf und

¹⁹Dies könnte in etwa der Vorgehensweise von SIMI Motion bei der Kalibrationsgütebestimmung entsprechen (vgl. Abschnitt 2.3).

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

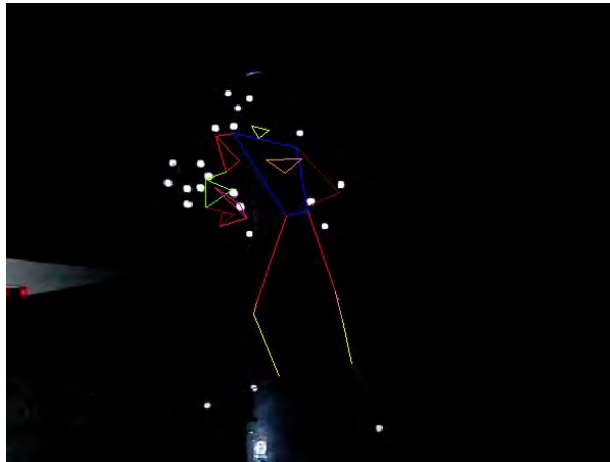


Abb. 3.24: Trotz guter Werte bei der Kalibrationsgütebestimmung von SIMI Motion entstanden durch systematische Passpunktkoordinatenabweichungen große Fehler bei der Rekonstruktion, die von der Software nicht erkannt wurden. Hier veranschaulicht an der Reprojektion der rekonstruierten Markerkoordinaten auf eine Kameraperspektive mit den verwendeten retroreflektierenden Markern am Beispiel einer Tischtennisaufnahme.

erzeugt dabei Sprünge in den ermittelten Trajektorien. Eine Ursache dafür liegt in den einzeln berechneten, nicht für das gesamte Kamerasystem *ausgeglichenen* DLT-Parametern der Kameras. Um die dabei im Mittel entstehenden Abweichungen quantifizieren zu können, könnte die Berechnung der Rekonstruktionsabweichung nach Gleichung 3.55 für alle Kamera-paare erfolgen und diese für die Bestimmung der Messunsicherheit der Rekonstruktion herangezogen werden. Dabei fällt diese Abweichung nicht nur für die einzelnen Kamera-paare unterschiedlich groß aus, sondern sie hängt auch stark von der jeweiligen Objektentfernung zu den Kamera-paaren ab, da sich die Kalibrationsfehler aufgrund der projektiven Abbildung abhängig von der Entfernung des Objektpunktes zur Bildebene metrisch unterschiedlich auswirken. Um dies abzubilden, können nach der Rekonstruktionsgenauigkeit gewichtete Ausgleichsverfahren verfolgt werden: Dazu werden in einem ersten Schritt die Passpunktkoordinaten einzeln mit allen Kamera-paaren bestimmt und die jeweiligen Rekonstruktionsabweichungen nach Gleichung 3.55 berechnet. Jedem Passpunkt kann anschließend ein Vektor mit den Rekonstruktionsabweichungen der einzelnen Kamera-paare zugeordnet werden. Durch Schätzung der Rekonstruktionsposition und Interpolation des aufgespannten Vektorraumes kann der passende Abweichungsvektor gewählt werden, dessen Komponenten als Gewichtungsfaktoren in den Least-Squares-Ausgleich zur Rekonstruktion der Objektpunkte eingehen. Eine ähnliche Erweiterung kann auch bei der Kalibrierung zur optimalen Bestimmung der DLT-Parameter aufgrund der unterschiedlichen Genauigkeiten der Bild- und Passpunktkoordinaten

genutzt werden. Zum Erkennen grober Abweichungen kann zudem bei genügender Anzahl an Messpunkten und verhältnismäßig geringer Auftretenswahrscheinlichkeit von Ausreißern eine statistische Ausreißeranalyse erfolgen (Details dazu siehe z. B. Lenzmann (1984), zitiert nach Navratil und Staudinger, 2006).

Mit einem zusätzlichen Modellblockausgleich der aus den einzelnen Kamera-paaren ermittelten Objektpunkte im Rahmen der Kalibrationsmessung kann nicht nur die Größe der auftretenden Sprünge in den Trajektorien durch Wegfall von Bildpunkten einzelner Kameras, sondern darüber hinaus die generelle Messunsicherheit reduziert werden. Die konkrete Umsetzung könnte beispielsweise durch Ausgleichsverfahren mit zusätzlichen Bedingungsgleichungen (für die Gleichheit der Passpunkte) erfolgen.

Das im statistischen Sinne optimale Ausgleichsverfahren für die Bestimmung der Messunsicherheit der Objektrekonstruktion ist jedoch der vollständige Bündelblockausgleich gemäß Abschnitt 3.3.3 mit einer konsequenten Behandlung der eingehenden Abweichungen und deren Fortpflanzung. Im Gegensatz zum Ausgleichsansatz bei der Bestimmung der DLT-Parameter mit Minimierung der Bildfehler kann im Bündelblockausgleich der globale, dreidimensionale Rekonstruktionsfehler minimiert werden.

Da alle Parameter der einzelnen Kameras in diesem gemeinsamen Ausgleich optimiert werden, sollte zudem das Problem der oben genannten Sprünge in den Trajektorien nicht mehr auftreten, lediglich die Unsicherheit der Rekonstruktion sollte beim Ausfall einzelner Kameras entsprechend größer werden. Daher scheint dieses Verfahren ideal für die Vorhersage der Messunsicherheit geeignet zu sein. Dabei besteht die Möglichkeit neben dem funktionalen Modell auch das stochastische Modell des Ausgleichs zu nutzen und aus den Unsicherheiten der Eingangsgrößen bereits erreichbare Unsicherheiten der Ausgangsgrößen zu bestimmen. Grundlage ist hierbei das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz. Vor der eigentlichen Messung („Beobachtung“, vgl. Abschnitt 3.3.3) wird den Beobachtungswerten \mathbf{L} eine Kovarianzmatrix Σ_{LL} zugeordnet (Navratil & Staudinger, 2006)²⁰:

$$\Sigma_{LL} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1\sigma_2 & \dots & \sigma_1\sigma_n \\ \sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_n\sigma_1 & \sigma_n\sigma_2 & \dots & \sigma_n^2 \end{pmatrix} \quad (3.56)$$

Sind die exakten Werte der einzelnen Varianzen und Kovarianzen bekannt, können diese direkt in die Matrix Σ_{LL} eingetragen werden. Bei relativen Genauigkeitsangaben wählt man für einen Wert die Bezugsvarianz $\sigma_0^2 = 1$ und bezieht die anderen relativen Genauigkeitsangaben auf diese. Für die Ausgleichung

²⁰auch hier folgt die weitere Betrachtung zum Großteil dem Skript von Navratil und Staudinger (2006), wird aus Gründen der Lesbarkeit jedoch nicht einzeln gekennzeichnet.

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

selbst kann man diese Werte als Eingangsgrößen für die Gewichtsmatrix \mathbf{P} nutzen. Dazu werden die einzelnen Elemente der Matrix durch die Bezugsvarianz dividiert und man erhält die sogenannte Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{LL} :

$$\mathbf{Q}_{LL} = \frac{1}{\sigma_0^2} \Sigma_{LL} \quad (3.57)$$

Aus dieser kann durch Inversion die Gewichtsmatrix \mathbf{P} bestimmt werden, die als Eingangsgröße für das Ausgleichsverfahren genutzt werden kann (vgl. Abschnitt 3.3.3).

Aus dem Kovarianzfortpflanzungsgesetz für ein Gleichungssystem $\mathbf{f} = \mathbf{F}\mathbf{x}$ kann das Kofaktorfortpflanzungsgesetz abgeleitet werden:

$$\mathbf{Q}_{ff} = \mathbf{F}\mathbf{Q}_{xx}\mathbf{F}^T \quad (3.58)$$

Damit kann die Kofaktormatrix des verkürzten Unbekanntenvektors direkt aus der invertierten Matrix in Gleichung 3.45 bestimmt werden:

$$\begin{pmatrix} -\mathbf{w} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_{kk} & \mathbf{Q}_{kx} \\ \mathbf{Q}_{kx}^T & -\mathbf{Q}_{xx} \end{pmatrix} \quad (3.59)$$

Daraus ergeben sich für die Kofaktormatrizen der Größen:

$$\mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{A}^T(\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T)^{-1}\mathbf{A})^{-1} \quad (3.60)$$

$$\mathbf{Q}_{kk} = (\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T)^{-1} - (\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T)^{-1}\mathbf{A}\mathbf{Q}_{xx}\mathbf{A}^T(\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T)^{-1} \quad (3.61)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{X}\hat{X}} = \mathbf{Q}_{xx} \quad (3.62)$$

$$\mathbf{Q}_{www} = \mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T \quad (3.63)$$

$$\mathbf{Q}_{vv} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{Q}_{kk}\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1} \quad (3.64)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{L}\hat{L}} = \mathbf{Q}_{LL} - \mathbf{Q}_{vv} \quad (3.65)$$

Aus den Kofaktormatrizen können mittels der Varianz σ_0^2 Kovarianzmatrizen gebildet werden. Alternativ kann unter Berücksichtigung der gewichteten Verbesserungswerte der Beobachtungen $v^T P v$ und der Freiheitsgrade (Gleichung 3.33) eine empirische Varianz bestimmt werden:

$$s_0^2 = \frac{v^T P v}{n_f} \quad (3.66)$$

$$\mathbf{C}_{\hat{X}\hat{X}} = s_0^2 \mathbf{Q}_{\hat{X}\hat{X}} \quad (3.67)$$

$$\mathbf{C}_{\hat{L}\hat{L}} = s_0^2 \mathbf{Q}_{\hat{L}\hat{L}} \quad (3.68)$$

$$\mathbf{C}_{vv} = s_0^2 \mathbf{Q}_{vv} \quad (3.69)$$

Setzt man die empirische Kovarianzmatrix gleich der vor der Messung angenommenen Kovarianzmatrix, so kann bereits ohne empirische Beobachtungen die resultierende Kovarianzmatrix ermittelt und damit die Genauigkeit des Ausgleichs vor der eigentlichen Messung bestimmt werden. Dieses Vorgehen entspricht der Berechnung der Unsicherheit auf Basis der Unsicherheitsverteilungen der Eingangsgrößen (vgl. Elster, 2007). Im Rahmen der Anwendung des Bündelblockausgleichs für die Bewegungserfassung könnte dies die Möglichkeit der Bestimmung von idealen Aufnahmeconfigurationen im Hinblick auf die zu erwartende Messunsicherheit bieten. Dabei werden allerdings etwaige durch Markerverdeckungen entstehende Probleme nicht berücksichtigt.

Grundlage für das vorgestellte Ausgleichsverfahren ist die Normalverteilung der Beobachtungen. Treten systematische Abweichungen in den Beobachtungen auf, die nicht im funktionalen Modell abgebildet sind, verzerren diese die Normalverteilung und wirken sich auf die Genauigkeit der Ausgleichslösung aus. Zudem kann die Fehlerfortpflanzung nicht mehr durch das Gaußsche Modell abgebildet werden und die ermittelten Unsicherheiten stimmen nicht mit der Realität überein. Sind jedoch die Abweichungen zur Normalverteilung klein, kann dies vernachlässigt werden. Darüber hinaus ist bei allen Ausgleichsverfahren eine vorherige Überprüfung auf Ausreißer (grobe Fehler) notwendig, da diese das Ergebnis stark beeinflussen können. Vor allem, wenn – wie bei automatisierten Bildauswertungen der Fall – nicht bekannt ist, welche der Zuordnungen korrekt sind, bieten sich statistische Ausreißeranalysen, z. B. das von Fischler und Bolles (1981) entwickelte RANSAC-Verfahren, an.

Eine alternative Lösung liegt in der Messunsicherheitsbestimmung durch Monte-Carlo-Simulationen (Horn, 2000). Grundlegendes Vorgehen ist dabei, Rauschen auf die Eingangsdaten aufzuschlagen und die Veränderung der damit berechneten Parameter zu ermitteln. Die daraus empirisch ermittelten Verteilungsgrößen liefern direkt eine Aussage über die Sensitivität der Ausgangsgrößen auf kleine Veränderungen der Eingangsgrößen und erlauben eine empirische Bestimmung der Messunsicherheit.

3.4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Abschnitt wurden die Funktionen von Kameras im Allgemeinen und im Hinblick auf ihre mathematische Modellierung im Speziellen erarbeitet (Tabelle 3.1). Nach einer Betrachtung der funktional relevanten Hardwarekomponenten Objektiv, Verschluss und Aufnahmemedium wurden ausgehend von einer idealen zentralprojektiven Kamera verschiedene Modellierungsmethoden erläutert (Zusammenfassung Tabelle 3.2). Besonderer Fokus wurde dabei auf die Korrekturmöglichkeiten von Abweichungen gelegt, die bei digitalen Consumer-Kameras auftreten können.

Tab. 3.1: Die Hardwarekomponenten, ihre Funktion und dabei v.a. bei digitalen Consumer-Kameras entstehende Abweichungen

Hardwarekomponenten	Funktion	Fehlerquellen bei Consumer-Kameras
Objektiv	Bündelung des einfallenden Lichts auf den Sensor	Bildfehler (v.a. radiale und tangentiale Objektivverzeichnungen)
Verschluss	Steuerung der Belichtungszeit	Rolling Shutter
Aufnahmemedium	Speicherung der Bildinformation	Bildrauschen, Dunkelrauschen, Farbrauschen, Pixelüberlauf (<i>Blooming</i> , <i>Smear</i>), <i>Aliasing</i> , <i>Moiré</i> , Vignettierung

Tab. 3.2: Funktionale Kameramodelle, Abbildungsverhalten und Parameteridentifikationsmethoden (Bündelblockausgleich (BA), Verzeichnungskorrektur (VZ))

Funktionales Modell	Abbildungsverhalten	Identifikationsmethoden
Ideal zentralprojektive Kamera	Kollinearitätsgleichungen	(M)DLT, BA
Reale Kamera ohne Verzeichnungskorrektur	Kollinearitätsgleichungen	(M)DLT, BA
Reale Kamera mit Verzeichnungskorrektur	Kollinearitätsgleichungen, Verzeichnungskorrektur (radial, tangential)	(M)DLT12-16, BA mit VZ

Die zuverlässige und präzise Identifikation der Parameter des gewählten Kameramodells ist Voraussetzung für eine geringe resultierende Messunsicherheit. Dabei ist es zum einen wichtig, die interne Genauigkeit des funktionalen Modells zu prüfen und damit die Eignung des gewählten Kameramodells sicherzustellen. Dies kann vor allem beim Einsatz von Consumer-Kameras und dementsprechend preisgünstigen Objektiven zusätzliche Parameter im funktionalen Modell, z. B. zur Verzeichnungskorrektur, bedingen, welche durch ihre Abhängigkeit von den Bildkoordinaten eine iterative Parameterschätzung notwendig machen.

Darüber hinaus muss allerdings auch die äußere Genauigkeit in Form der metrischen dreidimensionalen Rekonstruktionsabweichungen bestimmt werden, die

maßgebend die Messunsicherheit beeinflusst. Bei der direkten Lineartransformation hängt diese stark von den Passpunktgenauigkeiten und den zur Rekonstruktion vorhandenen Kameras ab. Variieren diese, können (systematische) Sprünge in den rekonstruierten Trajektorien entstehen. Durch die Anwendung des Modellblockausgleichs auf die rekonstruierten Objektkoordinaten der einzelnen Kamerapaare kann diese Situation verbessert werden, die Genauigkeitsanforderungen an die Passpunktkoordinaten bleiben jedoch bestehen. Dementsprechend wirken sich diese – vor allem bei großen Messvolumen – limitierend auf die maximal erreichbare Genauigkeit aus.

Um diese Situation zu entschärfen, kann ein Bündelblockausgleich auf Einzelbildebene durchgeführt werden. Dabei wird neben einer simultanen Kalibrierungsoption der Kameras auch eine statistisch optimale Schätzung der Parameter unter Voraussetzung der Normalverteilung der verbleibenden Restvariationen möglich. Dies stellt jedoch hohe Anforderungen an die Auswahl des zur Kamerahardware passenden funktionalen Modells und macht zudem Überprüfungen der entstehenden Abweichungen in den Näherungswerten sowie den Ausschluss von Ausreißern vor der Ausgleichsrechnung notwendig. Dabei ähnelt die Vorgehensweise bereits der Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM (vgl. Abschnitt 2.4), wobei dort keine unbekannt Parameter ermittelt werden müssen. Wird nicht nur das funktionale, sondern auch das stochastische Modell in den Bündelblockausgleich einbezogen, stellen die dort in einem Rechenvorgang aus den Eingangsgrößen und ihren Kovarianzmatrizen gewonnenen Ergebniskovarianzmatrizen direkt die Messunsicherheit nach GUM, die zu den für die Ergebnisanzeige notwendigen Konfidenzintervallen erweitert werden kann. Der Nachteil der Methode ist die aufwändige Berechnung des Ausgleichs und die hohe Fehleranfälligkeit der Ausgleichsrechnung bei nicht akkurat modellierten Systemeigenschaften oder dem Vorhandensein von Ausreißern in den Daten.

Generell wird deutlich, dass die Art der Messunsicherheitsbestimmung maßgebend von den an das System gestellten Genauigkeitsanforderungen abhängt. Mit den aus den DLT-Verfahren bestimmten Reprojektionsfehlern der einzelnen Kamerapaare können bei bekannten Passpunktgenauigkeiten und unter Ausschluss systematischer Fehler bei der Bestimmung der Passpunkte maximale Messabweichungen bestimmt werden, die nach Erweiterung auf Konfidenzintervalle als Messunsicherheitsangabe dienen können. Interessieren jedoch detaillierte Angaben zu den über das Messvolumen und je nach beteiligten Kameras variierenden Messunsicherheiten zu jedem Zeitschritt oder sogar als A-priori Abschätzung, fällt die Wahl auf das vorgestellte Ausgleichsverfahren. Die Möglichkeiten der Messunsicherheitsabschätzung sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Neben der Wahl und Implementierung der Kameramodellierungsmethode umfasst die Bewegungserfassung mit Consumer-Kameras noch weitere Prozessschritte. So müssen Methoden entwickelt werden, um aus den Videodaten die

3. MODELLIERUNG VON CONSUMER-KAMERAS

Tab. 3.3: Messunsicherheitsabschätzung

Methodentyp	Maß, Möglichkeiten der Methode
Reprojektionsfehler	interne Genauigkeit
Rekonstruktionsfehler	metrische Genauigkeit
Rekonstruktionsfehler (externe Validierungsmessung)	externe (metrische) Genauigkeit
stochastisches Modell des BA	interne Genauigkeit, Prädiktionsmöglichkeit

für die Kalibrierung und Objektrekonstruktion notwendigen Koordinaten der Bildpunkte zu extrahieren und diese zu Trajektorien zu verknüpfen. Zur Rekonstruktion der Objektkoordinaten muss gewährleistet werden, dass aus den so erstellten Trajektorien über mehrere nicht synchronisierte Kamera hinweg die Koordinaten zum identischen Zeitpunkt gewählt werden. Alle diese Schritte des zugrundeliegenden mehrstufigen Messprozesses dienen der Gewinnung von Eingangsgrößen für die Rekonstruktion, sind somit unsicherheitsrelevant und benötigen daher für eine Unsicherheitsbetrachtung zugeordnete Verteilungsgrößen. Im folgenden Abschnitt werden daher Methoden zur Bestimmung dieser weiteren notwendigen Eingangsgrößen im Hinblick auf das Konstanzer System betrachtet.

Systementwicklung

Der folgende Abschnitt beschreibt die konkrete Entwicklung des Konstanzer Bewegungserfassungssystems. Dazu wird zunächst die Funktion der eingesetzten Consumer-Kamera beschrieben, bevor anhand verschiedener Hardwaretests für die Bewegungserfassung kritische Eigenschaften identifiziert werden. Mit diesen Resultaten sollen zum einen die Wahl des Kameramodells, zum anderen eventuell zusätzlich notwendige Korrekturmechanismen begründet werden.

Neben einer präzisen Modellierung des Abbildungsverhaltens der Kamera sind für die Betrachtung der Messunsicherheit weitere Systemkomponenten relevant (vgl. Abschnitt 2.4). Daher werden manuelle und automatisierte Verfahren zur Extraktion der Koordinaten von Marker- oder Körperpunkten behandelt. Zur Trajektorienbestimmung aus den ermittelten Bildpunkten werden zweidimensionale Trackingmethoden vorgestellt. Da die Aufnahmen einzelner Consumer-Kameras im Allgemeinen nicht synchronisiert sind, dies jedoch eine Voraussetzung für eine gute dreidimensionale Rekonstruktion sich bewegender Objekte ist (vgl. Abschnitt 3.3.3), werden verschiedene Methoden zur Synchronisierung der Trajektorien analysiert. Zudem sind Verfahren zur Bestimmung korrespondierender Trajektorien notwendig, um aus den zweidimensionalen, synchronisierten Trajektorien die dreidimensionalen Trajektorien der Objektpunkte rekonstruieren zu können. Bei allen für die Bewegungserfassung notwendigen Prozesselementen wird dabei besonderer Wert auf die zur Bestimmung der Messunsicherheit notwendigen Größen gelegt.

Im Anschluss werden die implementierten Softwaremodule und Systemvarianten sowie die mit ihnen durchgeführten Tests und Validierungsmessungen beschrieben. Dabei werden anhand einer Simulationsumgebung die implementierten Methoden verifiziert und im Rahmen zweier beispielhafter Anwendungsszenarien die Gesamtfunktionalität validiert. Darauf aufbauend erfolgt die theoretische Messunsicherheitsbetrachtung für die implementierten Varianten.



Abb. 4.1: Die Consumer-Kamera Casio Exilim Pro EX-F1 bietet eine Highspeed-Videofunktion

4.1 Die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1

Die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1 ist als Consumer-Kamera grundsätzlich nicht für (photogrammetrische) Messanwendungen ausgelegt. Daher ist unklar, ob die Kamera für diese Anforderungen geeignet ist. Zudem finden sich in den vorhandenen Datenblättern und Bedienungsanleitungen keine detaillierten Angaben über ihr Abbildungsverhalten oder gar Unsicherheitsintervalle zu den Parametern. Da diese Daten dem Anwender wertvolle Information über das Messgerät geben können und zudem – wie in Abschnitt 3.3 erwähnt – bereits als Eingangsgrößen für die Ausgleichsrechnung berücksichtigt werden können, erfolgt in diesem Abschnitt nach einer kurzen Beschreibung der Kamerafunktionen die Darstellung der durchgeführten Hardwaretests zur generellen Eignung und zur Parameterbestimmung der Kamera.

4.1.1 Funktionsumfang

Die Fachgruppe Sportwissenschaft der Universität Konstanz benutzt 12 Digitalkameras des Typs Casio Exilim Pro EX-F1 zur Bewegungserfassung (Abb. 4.1). Die Besonderheiten dieser Kamera sind der große Funktionsumfang und der daraus resultierende weite Einsatzbereich im Vergleich zu „normalen“ Bewegungserfassungskameras. Das elektronisch gesteuerte 12-fach Zoomobjektiv bietet eine zur Kleinbildkamera vergleichbare Brennweite von 36-432 mm und ermöglicht damit eine Anpassung des Abbildungsmaßstabs an die aufzunehmende Szene bei einer gleichzeitig flexiblen Positionierung der Kamera (beispielsweise bei eingeschränkten Platzverhältnissen oder bei Distanzaufnahmen). Neben dem standardmäßigen Autofokus ist auch eine manuell einstellbare, elektronisch gesteuerte Fokussierung des Objektivs möglich.

4.1. Die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1

Tab. 4.1: Mögliche Bildraten und resultierende Sensorauflösung der Casio Exilim Pro EX-F1

Modus	Bildrate [1/Sek.]	Auflösung [px]
FHD	60 Halbbilder	1920 x 1080
HD	30 Bilder	1280 x 720
STD	30 Bilder	640 x 480
HS300	300 Bilder	512 x 384
HS600	600 Bilder	432 x 192
HS1200	1200 Bilder	336 x 96

Durch die unterschiedlichen Bildraten von 30 bis zu 1200 Bildern pro Sekunde kann die Kamera an die verschiedenen zeitlichen Anforderungen der Bewegungserfassung angepasst werden. Dazu ist es erforderlich, eine für die aufzunehmende Bewegung optimale Einstellung zu ermitteln. Wenn beispielsweise für eine Ganganalyse aufgrund der geringen Bewegungsgeschwindigkeit eine zeitliche Auflösung von 30 Bildern pro Sekunde ausreicht, kann durch die in diesem Modus höhere Auflösung der Kamera eine höhere räumliche Genauigkeit erreicht werden. Werden schnelle Bewegungen untersucht, so kann – unter Inkaufnahme einer geringeren Auflösung des aufgenommenen Videos – die zeitliche Abtastung auf bis zu 1200 Bildern pro Sekunde erhöht werden. In Tabelle 4.1 sind die möglichen Bildraten und die dazugehörigen Videoauflösungen dargestellt.

Die Kamera besitzt sowohl einen mechanischen als auch einen elektronischen Verschluss, wobei dieser nur bei einer Verschlusszeit von 1/1250 s bis 1/40000 s aktiv ist (Casio Computer Co. Ltd., 2008). Bereits das Benutzerhandbuch der Kamera weist auf Bildverzerrungen aufgrund der Eigenschaften des Bildsensors bei der Aufnahme von sehr schnell bewegenden Objekten hin (Casio Computer Co. Ltd., 2008), was auf die Verwendung eines Rolling-Shutters hindeutet (vgl. Abschnitt 3.1).

Die Kamera erlaubt im manuellen Modus eine freie Wahl der Lichtempfindlichkeit des Sensors zur Anpassung an die Helligkeit der Umgebung. Des Weiteren kann im Highspeed-Videomodus sowohl die Blendenöffnung als auch die Verschlusszeit manuell eingestellt und somit an die Anforderungen der Szene und Bewegung angepasst werden¹.

Typische Bewegungserfassungskameras müssen meist über Ethernet- oder Firewireverbindungen direkt an einem Erfassungssystem angeschlossen werden, um während der Aufnahme aufgrund des verhältnismäßig kleinen internen Speichers die Bilddaten direkt an einen PC übermitteln zu können. Im Gegensatz dazu kann diese Kamera unabhängig von PC und Stromquellen flexi-

¹Bei der Aufnahme von Full-HD-, HD- und SD-Videos muss dazu der Modus „Shutterspeed Priority“ gewählt werden und nach der Fokussierung die AE/AF-Lock Taste betätigt werden, um eine während der gesamten Aufnahme konstante Verschlusszeit und Blende zu gewährleisten. Eine manuelle Einstellung ist nicht möglich.

bel eingesetzt werden. Dies bringt jedoch unter anderem den Nachteil mit sich, dass die Aufnahme aufgrund fehlender Fernbedienungsoptionen bei jeder Kamera einzeln gestartet werden muss. Die Firma Casio bietet zwar eine Software an, mit der sowohl eine Fernsteuerung der Kamerafunktionen als auch eine direkte Übertragung der aufgenommenen Videodaten auf einen über eine USB-Verbindung angeschlossenen PC möglich ist, allerdings ist pro PC nur eine Kamera gleichzeitig steuerbar und damit der praktische Nutzen für ein Mehrkamera-Bewegungserfassungssystem nicht gegeben.

4.1.2 Testergebnisse DIWA-Labs

Die herstellerunabhängige Organisation DIWA² führt Kamera- und Objektivtests durch und stellt einen Teil der Testergebnisse auf ihrer Webseite kostenfrei zur Verfügung. Die Tests werden in einem speziell ausgestatteten Testlabor mit der Software DxO Analyzer der Firma DxO-Labs³ durchgeführt, die anhand vordefinierter Protokolle vergleichbare Testergebnisse sicherstellt und als der Branchenstandard gilt. DIWA-Labs stellt auch Testergebnisse für die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1 zur Verfügung, von denen die für die Wahl des Kameramodells relevanten im Folgenden berichtet werden.

Der größte Unterschied bei der Wahl des funktionalen Kameramodells für Consumer-Kameras liegt in den zusätzlichen Parametern, mit denen z. B. die Verzeichnungsterme beschrieben werden (vgl. Abschnitt 3.3.2). Daher werden in einem ersten Schritt die Verzeichnungseigenschaften der Kamera analysiert. Für die Bestimmung der Verzeichnung werden in der Software DxO Analyzer keine Parameter der Verzeichnungsfunktionen – wie z. B. in Abschnitt 3.2.2 beschrieben – bestimmt, sondern es wird nur ein prozentualer Wert berechnet. Dazu wird ein Testfeld mit einem äquidistanten Punktemuster aufgezeichnet, das zeilenweise ausgewertet wird. Die geometrische Verzeichnung des Bildes wird als prozentualer Wert des maximalen Punktabstandes zur Bildbreite angegeben ($V = \frac{\Delta l}{L}$, vgl. Abb. 4.2). Dabei resultiert ein positiver Wert für tonnenförmige Verzeichnungen, sowie ein negativer für die Kissenverzeichnung (DxO Labs, 2011).

Um eventuell auftretende chromatische Verzeichnungen auszublenden, wird dabei nur der grüne Bildkanal analysiert. In Abb. 4.3 sind die Ergebnisse des Tests dargestellt. Bei der getesteten Kamera der Serie Casio Exilim Pro EX-F1 beträgt die zu erwartende kissenförmige Verzeichnung in der weitwinkeligen Stellung des Kameraobjektivs⁴ maximal 0.45%, die maximale tonnenförmige Verzeichnung in der maximalen Teleposition -0.37%, wobei sich die Mittelwerte bei 0.28% bzw. 0.17% befinden. Gesamthaft weist die Kamera eine sehr geringe

²Digital Imaging Websites Association, <http://www.diwa-labs.com>

³<http://www.dxo.com>

⁴vgl. Abschnitt 3.2.2.

4.1. Die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1

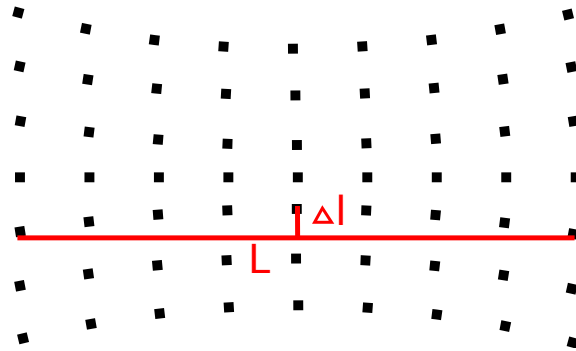


Abb. 4.2: Die Software DxO Analyzer berechnet die geometrische Verzeichnung aus dem Verhältnis der Bildbreite zur maximalen Abweichung von der Punktlinie (modifiziert nach DxO Labs, 2011)

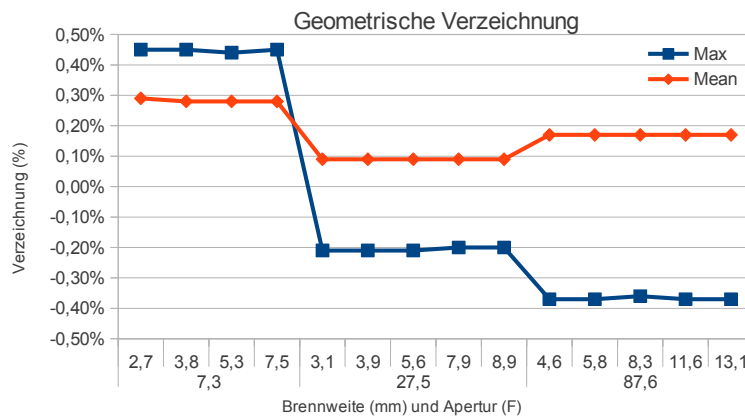


Abb. 4.3: Geometrische Verzeichnung der Casio Exilim EX-F1

Verzeichnung von unter einem Prozent über den gesamten Zoombereich auf. Ob integrierte Bildverarbeitungsalgorithmen oder die Qualität des Objektivs für dieses Ergebnis verantwortlich sind, kann auf Basis dieser Messung jedoch nicht unterschieden werden. Für die im Rahmen der sportwissenschaftlichen Bewegungserfassung relevanteste Betriebsart HS300 (vgl. Abschnitt 4.1.1) ergeben sich daraus die folgenden, anzunehmenden Pixelabweichungen von der Bildmitte zum Rand für die monochromatischen Verzeichnungen (MZ):

$$MZ_{weit} = 0,45\% \cdot \frac{512px}{2} = 1,15px \quad (4.1)$$

$$MZ_{tele} = -0,37\% \cdot \frac{512px}{2} = 1,45px \quad (4.2)$$

4. SYSTEMENTWICKLUNG

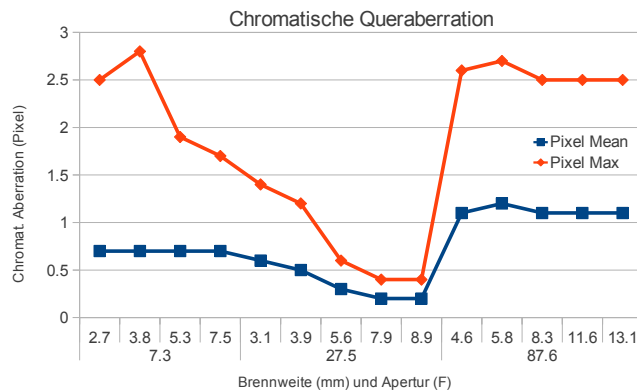


Abb. 4.4: Chromatische Aberrationen der Casio Exilim PRO EX-F1

Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist die Unabhängigkeit der Verzeichnung von der eingestellten Blende. Unabhängig von der Zoomposition bleiben alle Verzeichnungswerte bei Variation der Blendeneinstellung bis auf 0.01% konstant. Im Bezug auf die (radialen) Verzeichnungsparameter hat eine dynamische Blendeneinstellung somit keinen Einfluss auf die relevanten Kameraparameter und könnte eine Verwendung automatischer Programmfunktionen der Kamera ermöglichen, die z. B. Helligkeitsveränderungen während der Aufnahme dynamisch durch die Blendeneinstellung ausgleichen.

DxO Analyzer gibt den Farbquerfehler der Kamera als Pixelunterschied zwischen der roten und blauen im Vergleich zur grünen Farbebene an (vgl. Abschnitt 3.1). Abb. 4.4 stellt Maximalwert und Mittelwert des Farbquerfehlers für unterschiedliche Zoompositionen und Blendeneinstellungen dar. In den beiden Extremstellungen des Objektivs betragen die Maximalwerte 2.7 Pixel horizontal und 3.0 Pixel vertikal. Diese Angaben beziehen sich jedoch auf den RGB-Photomodus der Kamera und müssen zum Vergleich zu den monochromatischen, geometrischen Verzeichnungen umgerechnet werden. Für die Betriebsart HS300 ergeben sich dabei folgende horizontale und vertikale chromatische Abweichungen (CA):

$$CA_{hori} = \frac{2.7px}{2816px} \cdot \frac{512px}{2} = 0.25px \quad (4.3)$$

$$CA_{vert} = \frac{3.0px}{2112px} \cdot \frac{384px}{2} = 0.27px \quad (4.4)$$

Auch die Bestimmung der Modulation Transfer Function (MTF, vgl. Abschnitt 3.2.2) erfolgt bei DIWA-Labs im Fotomodus „RGB“ mit voller Sensorauflösung und ist damit nur eingeschränkt für die Videoaufnahme gültig. Sie ermöglicht jedoch eine generelle Einschätzung der Abbildungsqualität der Kamera und wird daher beispielhaft an den Ergebnissen der MTF-50%-Corner Messung berich-

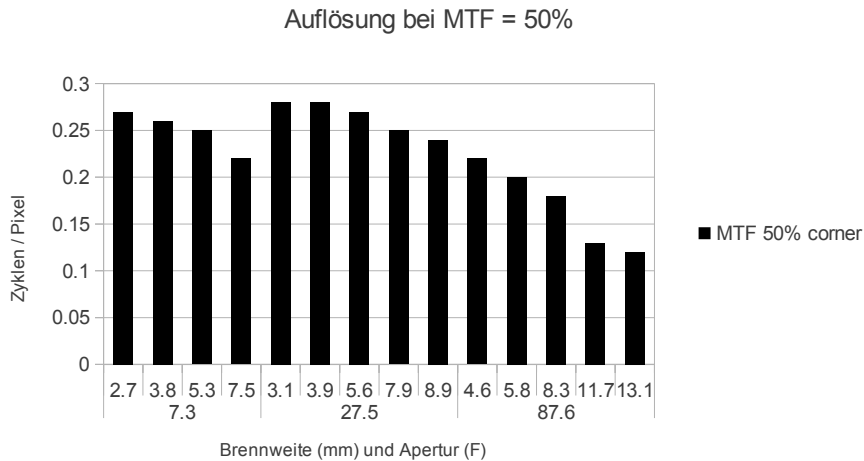


Abb. 4.5: Abhängigkeit der erreichbaren Ortsfrequenz von der Brennweite und Blende unter Annahme einer Kontrasterhaltung von 50% in den Ecken des Bildes (MTF 50% Corner)

tet⁵. In Abb. 4.5 werden die am Rand des Bildes erreichbaren Ortsfrequenzen des Kontrastbildes für einen resultierenden Kontrast von 50% (angegeben in Zyklen pro Pixel) abhängig von den Zoom- und Blendeneinstellungen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Auflösungsleistung des Systems von der Zoomposition und Blendeneinstellung des Objektivs abhängig ist. Generell kann aus der Abbildung geschlossen werden, dass für den fünfzigprozentigen Erhalt des Ausgangskontrastes über alle Zoom- und Blendeneinstellungen die abzubildenden Objekte eine geringere Ortsfrequenz als 0.1 Zyklen pro Pixel aufweisen sollten.

Exemplarisch sind in Abb. 4.6 für ein Sechzehntel der Grenzfrequenz⁶ (vgl. Abschnitt 3.2.2) die relativen Auflösungsleistungen separat für die einzelnen Farbkanäle über alle Zoom- und Blendeneinstellungen dargestellt. Dort zeigt sich zum einen – ähnlich wie in Abb. 4.5 – ein Abfall der Auflösungsleistung mit zunehmendem Zoom und stärker geschlossener Blende, zum anderen wird deutlich, dass vor allem bei offener Blende und weitwinkliger Objektivstellung die Auflösungsleistungen im grünen und roten Kanal höher als im blauen sind.

⁵Alle Ergebnisse der MTF-Tests finden sich in Anhang A.6.

⁶DxO Analyzer definiert diese jedoch nicht beim Nulldurchgang, sondern bei 10% Restkontrast.

4. SYSTEMENTWICKLUNG

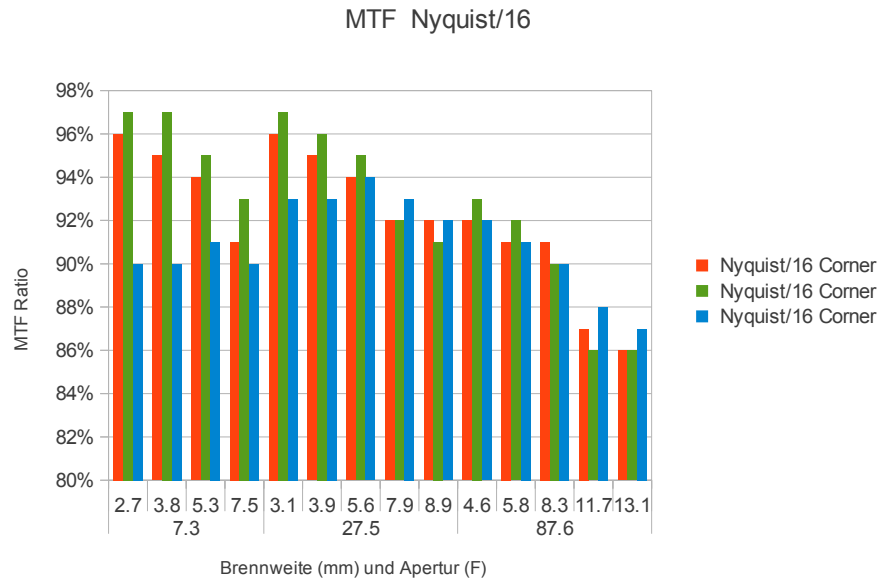


Abb. 4.6: Abhängigkeit der Auflösungsleistung der einzelnen Farbkanäle von Brennweiten- und Blendeneinstellung bei einer Ortsfrequenz von einem Sechzehntel der Grenzfrequenz

4.1.3 Test der Repositioniergenauigkeit

Die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1 ist mit einem motorbetriebenen Zoomobjektiv ausgestattet, das nur bestimmte Brennweiten (z. B. 36 mm, 39 mm, 41 mm, ... 100 mm, 107 mm, usw.) anfährt und keine manuelle Verstellmöglichkeit bietet (vgl. Abschnitt 4.1.1). Zusätzlich wird die Kamera von einem nicht deaktivierbaren Stromsparmodus nach maximal 10 Minuten abgeschaltet und dabei das Objektiv in die maximale Weitwinkelposition gefahren. Wurde die Speicherung der Zoomposition aktiviert, fährt das Objektiv nach dem Wiedereinschalten der Kamera automatisch an die alte Position zurück. Für die Bewegungserfassung mit dieser Kamera stellt sich daher die Frage, wie gut die Repositioniergenauigkeit des Zoomobjektivs ist, da Streuungen dieser das Abbildungsverhalten der Kamera beeinflussen. Änderungen im Abbildungsverhalten während eines Messsetups beeinflussen die Messgenauigkeit des Systems und sind somit zu vermeiden bzw. zu quantifizieren.

Zur Bestimmung der Repositioniergenauigkeit wurde ein aus 6x6 Rechtecken bestehendes Schachbrettmuster in DIN-A4-Größe aufgenommen. Das Schachbrettmuster ist ein oft verwendetes Objekt für die Bestimmung der Kameraparameter, da die Bildkoordinaten der Ecken der Rechtecke mithilfe von Bildver-

4.1. Die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1

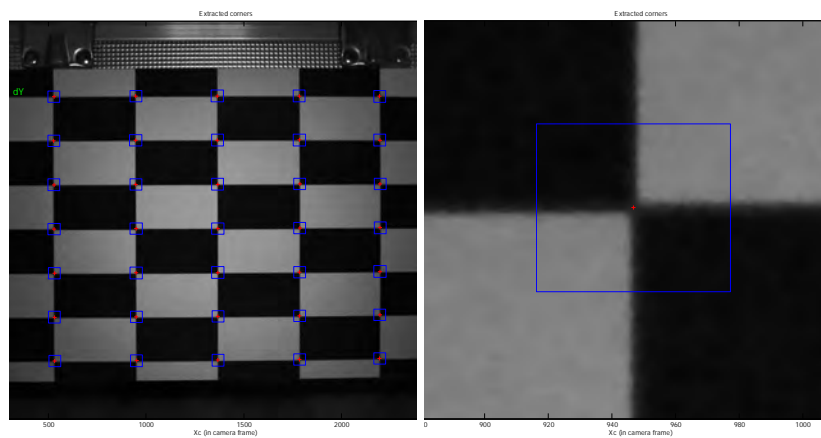


Abb. 4.7: Automatische Ermittlung der Kanten aller Rechteck-Ecken (links) und Extraktion der Kanten auf 0.1px genau (rechts)

arbeitungsalgorithmen mit einer Genauigkeit von unter 0.1px automatisch extrahiert werden können (Harris Kantendetektor, vgl. Abb. 4.7 und Bouguet, 1999). Das Schachbrettmuster wurde an einer Box befestigt, die in einem Abstand von 0.4 m zu einem Stativ positioniert war, auf das 12 Kameras nacheinander befestigt wurden (vgl. Abb. 4.8). Pro Kamera wurden zehn Aufnahmen des Musters gemacht, wobei zwischen jeder Aufnahme die Kamera aus- und wieder eingeschaltet wurde. Um die Bestimmung der Eckpunkte der Rechtecke so genau wie möglich durchführen zu können, wurden die Bilder mit der maximalen Sensorauflösung von 6.4 Megapixel aufgenommen⁷. Die Fokuseinstellung wurde für jede Kamera zu Beginn der Versuchsreihe manuell vorgenommen, um Einflüsse durch eventuelle Unterschiede in der automatischen Fokussierung auszublenden. Die Brennweite des Zoomobjektivs wurde auf 53 mm eingestellt, um das komplette Schachbrettmuster abzubilden. Die Auslösung der Kamera erfolgte zur Vermeidung von Erschütterungen durch einen Fernauslöser.

Aus den 6x6 Rechtecken ergaben sich insgesamt 49 Koordinaten der detektierten Kanten pro Aufnahme, die mittels eines Matlab Skripts und unter Verwendung der Bildverarbeitungsroutinen der „Camera Calibration Toolbox“ (Bouguet, 1999) bestimmt wurden. Aufgrund von Positioniergenauigkeiten beim Wechsel der Kameras waren die absoluten Bildpositionen der Rechteckecken zwischen den einzelnen Kameras nicht vergleichbar. Daher erfolgte nach der Ermittlung der absoluten Bildkoordinaten eine Berechnung der horizontalen und vertikalen Positionsveränderungen aller Rechtecke für die Bilder jeder einzelnen Kamera, bevor diese miteinander verglichen wurden.

⁷Weitere Kameraeinstellungen: Modus M, ISO 200, Blende 2.9, Verschlusszeit 1/400.



Abb. 4.8: Setup Repositioniergenauigkeitsmessung

Abb. 4.9 stellt die Ergebnisse graphisch dar. In der linken Spalte sind die horizontalen Abweichungen, in der rechten die vertikalen Abweichungen abgetragen. Jedes einzelne Diagramm zeigt auf der Abszisse den Index des jeweiligen Messpunktes und auf der Ordinate den Index der Aufnahme (von oben nach unten, 1 = erste Aufnahme). Neben den Unterschieden von der 1. Aufnahme zu den restlichen 9, sind an den Messpunkten 1 bis 7 und 42 bis 49 erhöhte Positionsabweichungen sichtbar. Diese konnten auf die unterschiedliche Genauigkeit der Kantendetektion bei nicht vollständigen Rechtecken (Abhängigkeit der Genauigkeit von der Kantenlänge des Rechtecks) am äußersten linken und rechten Rand zurückgeführt werden und wurden daher aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Die maximale Positionsabweichung über alle Kameras, Aufnahmen und die verbleibenden 35 Messpunkte beträgt 0.74px ($SD=0.40\text{px}$) in horizontaler und 1.03px ($SD=0.52\text{px}$) in vertikaler Richtung. Bei Ausschluss der ersten Aufnahme betragen die maximalen Abweichungen in horizontaler Richtung 0.59px ($SD=0.21\text{px}$) und in vertikaler Richtung 0.53px ($SD=0.26\text{px}$). Der Unterschied zwischen den Aufnahmen war die „manuelle“ Einstellung der Brennweite über den Zoomhebel im ersten Bild im Vergleich zum automatischen Anfahren der Position nach Einschalten in den weiteren Aufnahmen (in Abb. 4.9 sind die größeren Differenzen v.a. bei Kamera 2 und 7 horizontal sowie Kamera 1, 4 und 7 vertikal erkennbar).

Wie oben erwähnt, wurden die Messungen mit der maximalen Sensorauflösung durchgeführt, um die beste Genauigkeit der Kantenextraktion zu erhalten. Für einen Transfer der Ergebnisse auf die praktisch relevante Einstellung der Highspeedvideos muss die reduzierte Sensorauflösung in diesem Modus in Betracht gezogen werden. Da die Kamera in den Highspeedmodi mehrere

4.1. Die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1

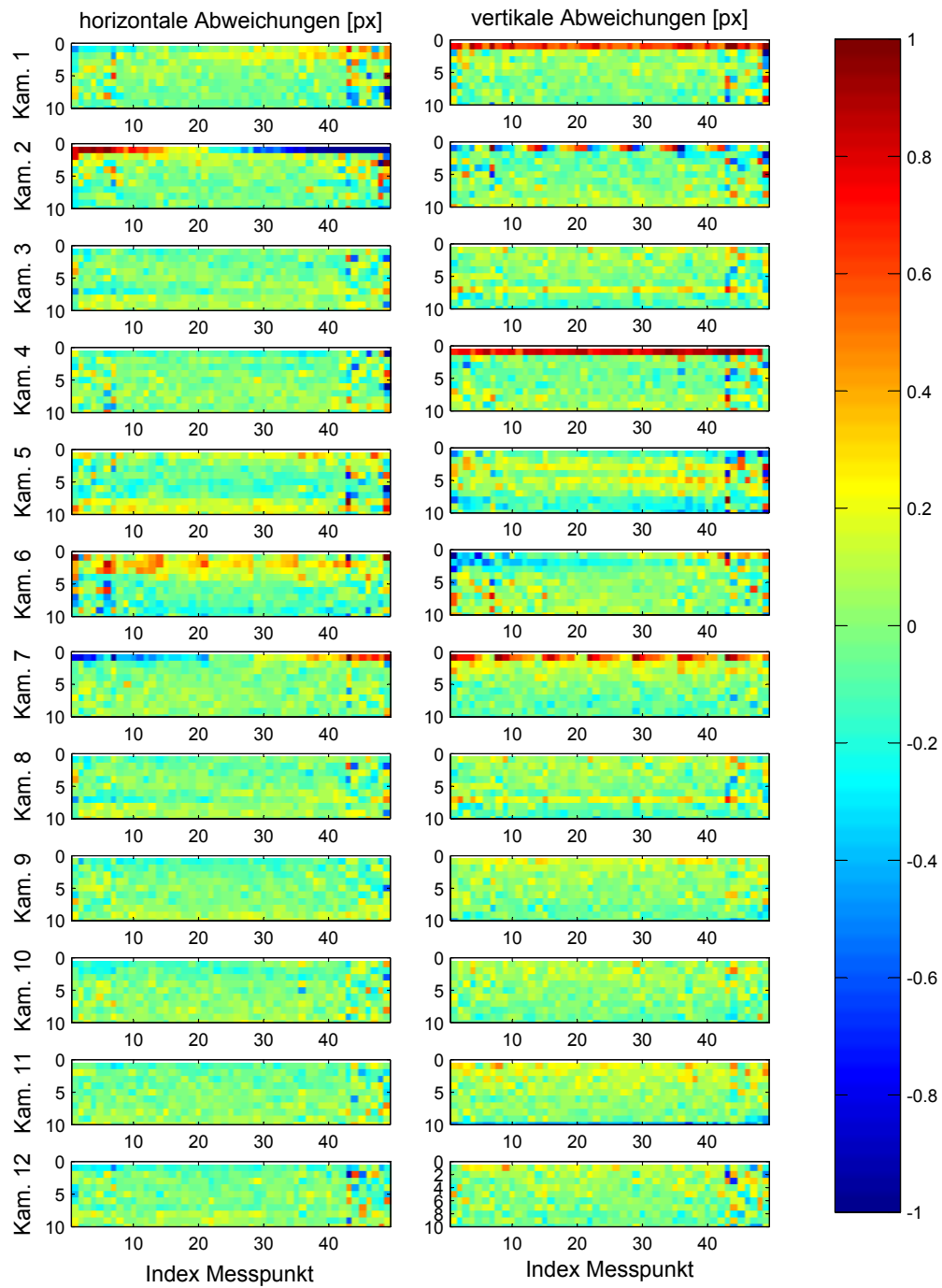


Abb. 4.9: Horizontale und vertikale Positionsabweichungen vom Mittelwert der 49 Messpositionen (Abszisse) aus 10 Aufnahmen (Ordinate) für alle Kameras: der Farbwert entspricht der Abweichung in Pixeln gemäß Legende.

Sensorexel zu einem Bildxel zusammenfasst⁸, sollte der Positionierungsfehler entsprechend kleiner sein. Die Bildauflösung im HS300-Modus beträgt 512x384 Pixel, im Gegensatz zur Fotoauflösung von 2816x2112 Pixeln. Ein Vergleich mit aus einer Highspeedaufnahme extrahierten Bildern ergab bereits bei nur einer Kamera eine maximale horizontale Abweichung von 0.60px ($SD=0.21px$) und eine vertikale Abweichung von 0.53px ($SD=0.26px$). Ein möglicher Grund für die deutlich größer als erwartete horizontale Abweichung könnte eine Beeinflussung des Kantendetektors durch die bei der Videokomprimierung entstehenden Bildartefakte sein⁹.

Die Ergebnisse zeigen einen Unterschied zwischen dem „manuellen“ Anfahren der Objektivstellung im Betrieb und dem „automatischen“ Anfahren einer gespeicherten Position. Da die gespeicherte Position genauer angefahren wird, kann der Anwendungshinweis abgeleitet werden, die Kamera nach dem Setup vor der ersten Messung oder Kalibrierung einmal aus- und wieder einzuschalten.

4.1.4 Test der Videobildrate

Bei der kamerabasierten Bewegungserfassung erfolgt eine statische Ortsbestimmung relevanter Körperpunkte in jedem aufgenommenen Videobild. Aus diesen Bildkoordinaten werden mit der durch die Bildrate festgelegten Zeitintervalle physikalische Kenngrößen, wie z. B. Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen, ermittelt. Um diesen Berechnungsschritt durchführen zu können, ist es notwendig, die Bildrate und deren Streuung zu kennen. Die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1 besitzt, wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, mehrere Einstellmöglichkeiten für die Bildrate. Da zur Aufnahme der meisten sportlichen Bewegungen eine Bildrate von 30fps¹⁰ zu gering ist und der selten benötigten höheren Bildraten, erfolgt in diesem Versuch nur die Messung der absoluten Bildrate für 300fps.

Zur Bestimmung der absoluten Bildrate ist ein Referenzzeitgeber notwendig. Im vorliegenden Versuch wurde dieser durch die Stoppuhrfunktion einer Casio G-Shock DW6500 bereitgestellt, die Hundertstelsekunden digital anzeigt. Die Kamera wurde im Abstand von 0,1m vor der Uhr positioniert, so dass ein gut aufgelöstes Bild der Stoppuhranzeige entstand (vgl. Abb. 4.10). Nach dem Start der Videoaufnahme wurde die Stoppuhr gestartet und das Video für 11 Minuten aufgenommen. Dies wurde für alle 12 Kameras durchgeführt, wobei diese mit vollem Batteriestand betrieben wurden. Die aufgenommenen Videos wurden mit dem Quicktime Player manuell ausgewertet, da dieser Einzelbildvor- und rücklauf

⁸vgl. Datenblatt des Sensors IMX017CQE, http://www.sony.net/Products/SC-HP/cx_news/vol47/pdf/imx017cqe.pdf [02.08.2009]

⁹Die Kamera komprimiert die Bildinformation mit dem H.264 Codec in einen Quicktime-Container (*.mov).

¹⁰fps: frames per second, Bilder pro Sekunde

4.1. Die Kamera Casio Exilim Pro EX-F1



Abb. 4.10: Setup zur Bestimmung der Bildrate: Auslesezeitpunkt 00:02:01, links unten die Frame-
nummer des Videobildes (36704 Frames)

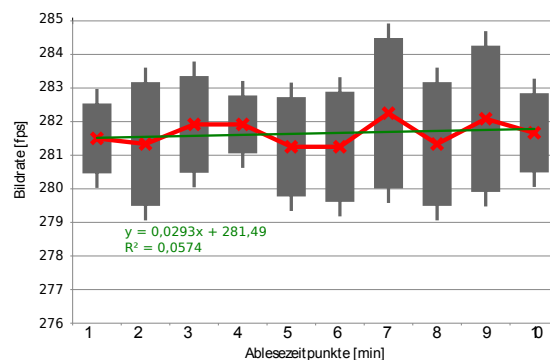


Abb. 4.11: Mittelwert und Standardabweichungen der ermittelten Bildrate

besitzt und nicht nur den aktuellen Zeitpunkt, sondern auch die Framenummer anzeigt. Dabei wurden jeweils die Zeitpunkte notiert, an denen auf der Stoppuhr ein Wechsel auf die erste Sekunde nach jeder vollen Minute erfolgt ist (also bei 00:00:01, 00:01:01, 00:02:01, ..., bis 00:10:01). Die Differenz zwischen den Framenummern zu den einzelnen Zeitpunkten entspricht der Bildrate pro Minute, die für die weitere Auswertung in eine Bildrate pro Sekunde umgerechnet wurde.

Abb. 4.11 zeigt die ermittelten mittleren Bildraten für die verwendeten 12 Kameras und deren Standardabweichung. Die Kamera nimmt beim Betrieb im HS300-Modus im Gesamtmittel mit 281,65fps auf, was einer 6% langsameren Bildrate als der angegebenen entspricht. Es erfolgt kaum eine Drift der Bildrate über den Aufnahmezeitraum und die maximale Standardabweichung ist mit 2,24 fps eher gering, vor allem, da ein Großteil dieser möglicherweise auf Ablesefehler

der digitalen Anzeige zurückzuführen ist. Aufgrund der Trägheit des Materials im Flüssigkristalldisplay war der exakte Umschaltzeitpunkt zwischen der Anzeige von 00 und 01 schwierig zu bestimmen. Zur genaueren Durchführung wäre entweder eine spezielle Hochgeschwindigkeitsanzeige, die im Bereich von 3 ms noch trennscharf darstellt, oder die Ansteuerung von mehreren LEDs mittels eines Frequenzgenerators und die zusätzliche Darstellung einer Stoppuhr zur Angabe der Minuten notwendig.

Trotz der genannten Ableseungenauigkeiten kann festgehalten werden, dass die Kamera im HS300-Modus statt einer angegebenen Bildrate von 300fps im Mittel nur mit 281.65fps aufzeichnet. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Kameras um bis zu 4.5 Bilder (Ablesezeitpunkt 7). Eine Drift der Bildrate über den Ablesezeitraum konnte nicht identifiziert werden. Unklar bleibt jedoch, ob die Abweichungen der Bildrate abhängig vom aufgezeichneten Bildinhalt sind, was z. B. durch unterschiedliche Rechenzeiten der Kompressionsalgorithmen je nach zu verarbeitender Bildinformation entstehen könnte.

4.1.5 Test der Rolling-Shutter-Effekte

Bereits im Handbuch der Kamera wird auf mögliche Verzerrungen bei der Aufnahme schnell bewegter Objekte hingewiesen (Casio Computer Co. Ltd., 2008). Daher liegt die Vermutung nahe, dass ein Rolling-Shutter verbaut ist (vgl. Abschnitt 3.1). Dies bedeutet, dass z. B. bei vertikaler Orientierung des Schlitzverschlusses die Zeile 1 des Bildsensors zu einem anderen Zeitpunkt als die Zeile n belichtet wird. Dementsprechend werden Daten auf unterschiedlichen Zeilen zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst und je nach Zeitversatz und Objektgeschwindigkeit treten unterschiedlich große Verzerrungen der abgebildeten Objekte auf (vgl. Abb. 3.7). Ziel dieser Messung ist die Bestimmung des Zeitversatzes bzw. die Bestimmung des Rolling-Shutter-Faktors, der die Verschiebung in Abhängigkeit von der vertikalen Bildposition und der Objektgeschwindigkeit ausdrückt.

Dazu wurde das bereits oben verwendete Schachbrettmuster auf einem auf Rollen gelagerten Wagen befestigt, der sich im Abstand von 260 cm vor dem Objektiv befand (vgl. Abb. 4.12) und parallel zur Bildebene bewegt werden konnte. Um die relative Geschwindigkeit des Objektes auf dem Bild zu maximieren, wurde das Objektiv auf die maximale Teleposition (362 mm) eingestellt. Es wurde der Highspeedmodus HS300 gewählt und der ISO-Speed betrug 400. Die Messungen erfolgten mit jeweils acht Bewegungen des Wagens nach links und nach rechts bei verschiedenen Verschlusszeiten (1/320, 1/500, 1/800, 1/1000, 1/2000), um einen möglichen Einfluss dieser Parameter auf den Rolling-Shutter-Faktor detektieren zu können.

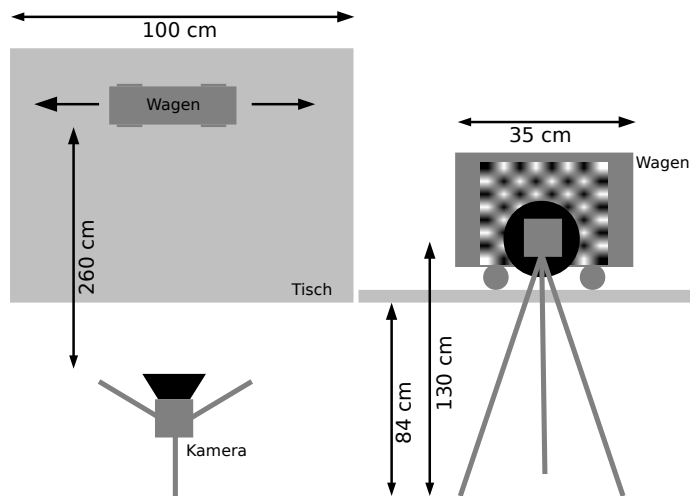


Abb. 4.12: Draufsicht (links) und Frontalansicht (rechts) des Setups zum Test der Rolling-Shutter-Effekte

Für jede Bewegungsrichtung wurden elf Bilder aus dem Video extrahiert, die Koordinaten der Ecken sämtlicher Felder mit den Bildverarbeitungsroutrinen der „Camera Calibration Toolbox“ (Bouquet, 1999) detektiert (vgl. Abb. 4.7) und anhand dieser vertikale Ausgleichsgeraden angepasst (vgl. Abb. 4.13, links). Geht man davon aus, dass durch den Schlitzverschluss die unteren Bildzeilen später belichtet werden als die oberen, verändert sich der Winkel der vertikalen Geraden je nach Objektgeschwindigkeit (vgl. Prinzipskizzen in Abb. 4.13, Mitte und rechts bzw. Abb. 4.14 für ein Bild aus einem Testvideo). Dabei muss sichergestellt sein, dass das Objekt exakt parallel zur horizontalen Sensorachse bewegt wird. Abweichungen davon führen zu einer schlitzverschlussbedingten Verzerrung der ursprünglich horizontalen Geraden, die sich in einer von der Bewegungsrichtung abhängigen systematischen Winkelveränderung auswirkt. Da die Ausrichtung im verwendeten Setup nicht so exakt vorgenommen werden konnte, musste der entstehende systematische Fehler rechnerisch korrigiert werden. Dazu wurde neben der vertikalen Gerade auch eine horizontale Gerade angepasst und die Steigung dieser zur Korrektur des vertikalen Winkels herangezogen. Fehler durch den Rolling-Shutter wurden dabei vernachlässigt, da die Abweichungen kleiner als ein Pixel über die gesamte Aufnahmebreite (512px) waren und die Aufnahme daher als zeilensynchron angenommen wurde. Aus den so gewonnenen Daten kann ein Proportionalitätsfaktor für den Zusammenhang zwischen Objektgeschwindigkeit und der ermittelten Geradensteigung bestimmt werden. Dieser entspricht der Änderung der horizontalen Koordinate auf ein Pixel vertikalem Offset bei 1px/frame Horizontalgeschwindigkeit.

4. SYSTEMENTWICKLUNG

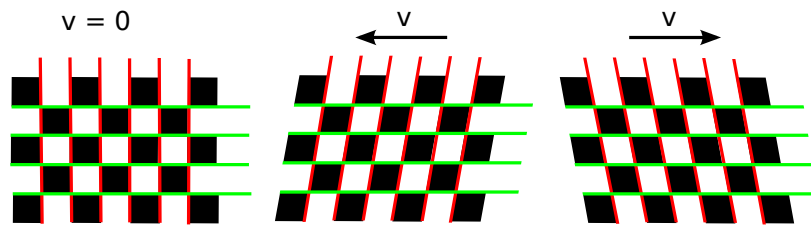


Abb. 4.13: Bei unbewegtem Objekt sind die Winkel des Schachbrettmusters 90° (links). Bewegt sich das Objekt verzerren sie sich durch die Zeitverzögerung des Rolling-Shutters (Mitte und rechts).

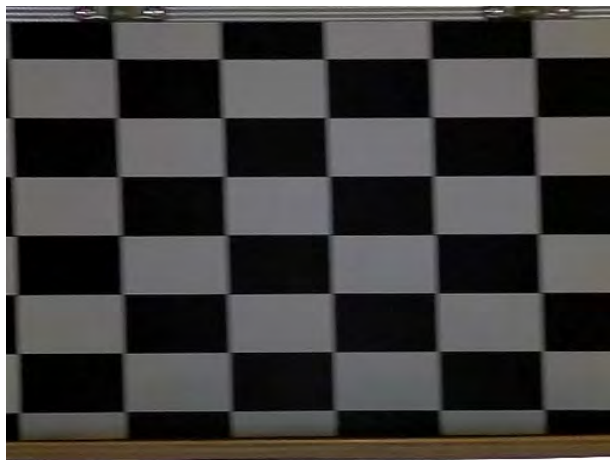


Abb. 4.14: Standbild aus einem Testvideo zur Rolling-Shutter-Faktor Bestimmung. Das Objekt bewegt sich von links nach rechts und führt zu Verzerrungen des Schachbrettmusters aufgrund der verzögerten Belichtung vertikaler Sensorreihen.

Erweitert man diese Gleichung mit der aktuellen vertikalen Position des Objektpunktes, so kann ein Korrekturwert für die horizontale Position angegeben werden:

$$\Delta x_{RS} = y_i \cdot m_{vert} \cdot (x_i - x_{i-1}) \quad (4.5)$$

mit

- Δx_{RS} : Rolling-Shutter-Offset der x-Koordinate
- x_i : x-Koordinate in Bild i [px]
- x_{i-1} : x-Koordinate in Bild i-1 [px]
- y_i : y-Koordinate in Bild i [px]
- m : Steigung der gefitteten vertikalen Geraden [px]

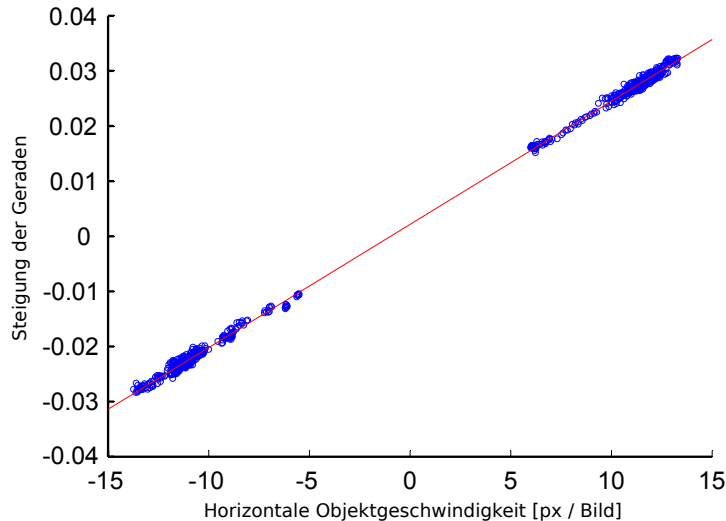


Abb. 4.15: Messdaten aus den Rolling-Shutter-Tests mit angepasster Ausgleichsgeraden zur Bestimmung der Verzögerungszeit des Rolling-Shutters. Horizontal ist die gerichtete Horizontalgeschwindigkeit des Objektes angetragen, vertikal die entstehenden Abweichungen pro Pixel vertikalem Versatz.

Die Annahme, dass in der Kamera ein Rolling-Shutter verbaut ist, konnte bestätigt werden. Abhängig von der Objektgeschwindigkeit ergaben sich unterschiedliche Abweichungen in der Horizontalposition. Der Zusammenhang zwischen Objektgeschwindigkeit und den Abweichungen pro Pixel in vertikaler Richtung ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Bei einem linearen Fit der beiden Punktwolken ergibt sich daraus eine Abweichung von $m_{vert}=0.00224$ ($SD=0.00022$) für ein Objekt, das sich mit einer horizontalen Geschwindigkeit von $1\text{px}/\text{Frame}$ auf der zweiten Zeile des Sensors bewegt. Formt man diese Gleichung um, so ergibt sich bei einer angenommenen Bildrate von 281.65 fps (Abschnitt 4.1.4) eine Rolling-Shutter Verzögerungszeit von $\Delta t_{RS} = 10.245\mu\text{s}$ ($SD=1.002\mu\text{s}$). Für die Anwendung im Rahmen der Bewegungserfassung kann diese Verzögerung eine weitere Fehlerquelle darstellen, da das einzelne Bild – vor allem bei schnellen Objektbewegungen, z. B. im sportwissenschaftlichen Umfeld – nicht mehr als eine Momentaufnahme betrachtet werden kann. Bereits bei einer Objektgeschwindigkeit von $4\text{px}/\text{frame}$ ¹¹ würde dies für ein sich auf der zweihundertste Bildzeile bewegendes Objekt einen horizontalen Pixelfehler von 1.79px bedeuten.

¹¹im HS300-Modus der Kamera

4.1.6 Zusammenfassung

Die in Konstanz verwendete Kamera Casio Exilim Pro EX-F1 weist generell eine sehr gute Abbildungsqualität auf. Besonders die geringe radiale Verzeichnung von im Mittel unter 0.3% über den gesamten Zoombereich unabhängig von der eingestellten Blende legt – zumindest für moderate Genauigkeitsanforderungen – eine Nutzung linearer Kameramodelle nahe. Da die automatische Repositionierung des motorbetriebenen Objektivs nach dem Ausschalten der Kamera genauer ist als das manuelle Anfahren, sollte die Kamera vor einer ersten Messung aus- und eingeschaltet werden. Tests der Videobildrate ergaben eine systematisch langsamere, jedoch konstante Bildrate von 281.65fps ($SD=2.24\text{fps}$) über 10 Minuten Aufnahmedauer. Bei der Bestimmung der Rolling-Shutter-Effekte konnte eine Zeilenbelichtungszeit von $10.245\mu\text{s}$ ($SD=1.002\mu\text{s}$) ermittelt werden, die im weiteren Verlauf der Arbeit zur Korrektur der Bildinformation herangezogen werden kann. Zusammenfassend wurden bei den durchgeführten Tests keine Hinweise gefunden, die eine Anwendung der Kamera im Rahmen der Bewegungserfassung von vornherein ausschließen würden.

4.2 Vom Video zur 3D-Trajektorie

Die Kamera und die Modellierung ihres Abbildungsverhaltens sind die zentralen Bausteine eines Bewegungserfassungssystems. Darüber hinaus sind jedoch zur Bestimmung der Eingangsgrößen für die Parameteridentifikationsverfahren und für die Rekonstruktion der erfassten Bewegung weitere Systemkomponenten notwendig: Aus den erfassten Videos müssen Einzelbilder extrahiert werden, in denen manuell oder automatisiert die Koordinaten der relevanten Körperpunkte oder der verwendeten Marker bestimmt werden. Beim Einsatz automatischer Extraktionsmethoden muss zusätzlich ein zeitlicher Zusammenhang zwischen den einzelnen Markerpositionen in den aufeinanderfolgenden Einzelbildern hergestellt werden (*Tracking*). Außerdem muss für die Nutzung der entstehenden Trajektorien zur dreidimensionalen Rekonstruktion die Synchronität und die räumliche Korrespondenz der Trajektorien der verwendeten Kameras gewährleistet sein. Aufgrund der Vielfalt der dazu in der Literatur beschriebenen Verfahren werden in diesem Abschnitt nur die für das Konstanzer System oder die Messunsicherheitsbestimmung besonders relevanten Verfahren vorgestellt.

4.2.1 Videodecodierung

Im Gegensatz zu industriellen Kameras nutzen alle Consumer-Kameras Komprimieralgorithmen zum Speichern der Videos. Das bedeutet, dass nicht die rohen oder aufbereiteten Pixelwerte aus dem Bildsensor abgespeichert werden, sondern dass je nach Codec¹² eine Komprimierung der Bildinformation in Bezug auf das Einzelbild und in Bezug auf die Bildfolge stattfindet. Erst dadurch wird es möglich, längere Videosequenzen auf portablen Medien zu speichern. Die in Konstanz verwendete Kamera Casio Exilim Pro EX-F1 (vgl. Abschnitt 4.1.1) nimmt beispielsweise im 300fps-Videomodus ein Farbbild mit einer Auflösung von 384px x 512px auf. Würde dieses nicht komprimiert werden, hat bereits ein einzelnes Bild 576kB, was bei einer Sekunde Video 168MB entsprächen. Nicht nur die Speicherung eines solchen Datenstroms, sondern auch die Masse der dabei anfallenden Daten wäre in mobilen Systemen aktuell kaum zu bewältigen. Jede Komprimierung ist allerdings auch mit Datenverlust verbunden, der zwar bei Consumer-Kameras von den Herstellern so gewählt wird, dass dies dem menschlichen Auge möglichst wenig auffällt, der jedoch im Rahmen der Bewegungserfassung beispielsweise auf die Genauigkeit der Bestimmung der Markerzentren großen Einfluss haben könnte. Zudem kann durch die zeitliche Komprimierung je nach Codec eine Unschärfe im Bezug auf die Indizierung der Bildnummern im Video entstehen und damit die Synchronität der einzelnen Ka-

¹²dem Komprimieralgorithmus, ein Kunstwort aus dem Englischen code/decode

meras zueinander in Frage stellen. Daher ist es sinnvoll, entweder in einem ersten Schritt aus dem Video Einzelbilder zu extrahieren und mit diesen weiterzuarbeiten oder sämtliche Verarbeitungsschritte zur Extraktion der Markerkoordinaten in einem Auslesedurchgang zu implementieren. Eine weitere Möglichkeit könnte darin bestehen, bei jedem neuen Laden des Videos nicht direkt zu indizieren, sondern immer vom Videobeginn jedes Bild bis zur gewünschten Stelle zu decodieren, um Indizierungsfehler zu vermeiden. Die Entscheidung für die jeweilige Variante muss je nach Anwendung gefällt werden, der Unterschied liegt dabei in einem großen Speicherbedarf beim Speichern der Einzelbilder im Vergleich zu einem besonders bei langen Videos mit hohen Bildraten wesentlich höheren Zeitaufwand beim Laden der relevanten Bilder.

Da die Umwandlung der Highspeedvideos der in Konstanz eingesetzten Kamera in einzelne Bilder sehr speicher- und zeitaufwändig ist, wurde ein Interface zur direkten Auswertung der Videodateien entwickelt. Unter Verwendung der Inline-Videobearbeitungsfunktion der „mmread“ Toolbox¹³ können die notwendigen Bildverarbeitungsalgorithmen direkt beim Einlesen des Videos ausgeführt werden und damit auch umfangreiche Videodatensätze schnell und automatisch bearbeitet werden. Zudem wurde eine graphische Benutzerumgebung erstellt, die auch programmierunerfahrenen Benutzern den Umgang mit der Software erlauben soll (Abb. 4.16). Bei der Bewegungserfassung mit Consumer-Kameras entstehen viele einzelne Videoclips, da die Aufnahme typischerweise für jede einzelne Szene neu gestartet wird. Somit stellen Verwechslungen der Dateien und falsche Referenzen aus den Algorithmen eine potentielle Fehlerquelle dar. Mit dem graphischen Benutzerinterface können diese Videodateien für Kalibrations- und Szenenvideos den einzelnen Kameras zugeordnet werden und die Zuordnungen in einer Projektdatei abgespeichert werden. Dieses kann für die spätere Bearbeitung erneut geladen werden und enthält neben den Kamera- und Datei-zuordnungen alle für die Bewegungserfassung wichtigen Informationen (z. B. die Start- und Endzeitpunkte oder die bereits extrahierten Koordinaten der einzelnen Szenen).

4.2.2 Manuelle Koordinatenbestimmung

Die Wahl der Auswertemethoden zur Erfassung relevanter Körperpunkte einer Person hängt stark von den Markierungsmöglichkeiten dieser Punkte ab. Im einen Extrem, in der sportwissenschaftlichen Anwendung beispielsweise bei der Aufnahme von Videos in Wettkampfsituationen, können keine Markierungen am Athleten angebracht werden. Die Erfassung der relevanten Punkte muss dann

¹³mmread – read virtually any media file in Windows, Linux, or Mac. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8028> [19.08.2009]

4.2. Vom Video zur 3D-Trajektorie

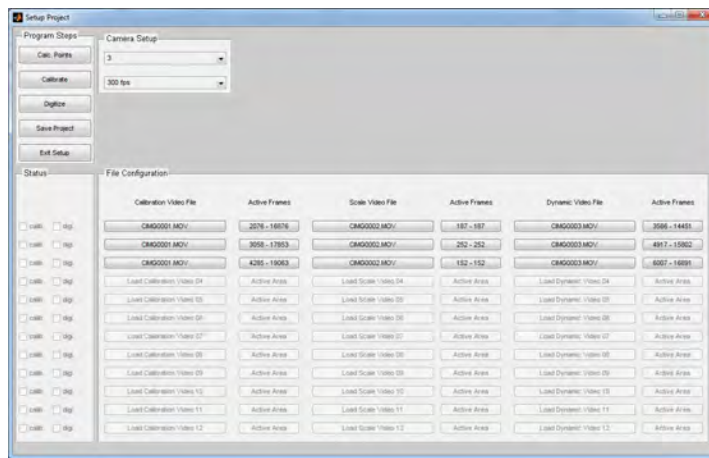


Abb. 4.16: Das entwickelte graphische Benutzerinterface erlaubt die projektorientierte Zuordnung der aufgezeichnet Videodateien zu den Kameras sowie die Auswahl aufnahmespezifischer Parameter. Es dient zudem als zentrales Interface zur Auswahl aller weiteren relevanten Funktionen im Rahmen der Bewegungserfassung (z. B. Kalibrierung, Markerextraktion, Details finden sich in den entsprechenden Abschnitten).

typischerweise manuell erfolgen¹⁴. Dazu wird im Vorfeld anhand eines Körpermodells die Anzahl und Bezeichnungen der zu identifizierenden Körperpunkte definiert. Anschließend wird das Video in einem graphischen Benutzerinterface dargestellt, das es ermöglicht, meist mit der PC-Maus oder einem Digitalisierinterface die Punkte zu identifizieren. Die Art und Funktionalität des graphischen Benutzerinterfaces kann dabei maßgeblich die Fehleranfälligkeit des Prozesses beeinflussen.

Im Rahmen der Systementwicklung des Konstanzer Systems wurde ein solches Benutzerinterface in Matlab¹⁵ implementiert (Abb. 4.17). Durch die Auswahl einer zuvor erstellten Projektdatei, die neben der Referenz auf die Videodatei und den relevanten zeitlichen Videobereichen auch die Definition des Körpermodells beinhaltet, wird das Video in das Benutzerinterface geladen. Rechts neben dem Video wird der Name des aktuell zu identifizierenden Körperpunktes angezeigt. Wurde dieser bestimmt, springt das System automatisch zum nächsten Körperpunkt.

¹⁴es gibt auch die Möglichkeit der halbautomatischen Verfolgung, bei der nach manueller Initialisierung der zu verfolgenden Punkte die Bewegung eines Teilbildes um diese Punkte korrelationsbasiert von Bild zu Bild identifiziert wird. Diese Variante reduziert zwar den Auswerteaufwand, funktioniert allerdings nur bei möglichst gleichbleibenden Bildausschnitten zuverlässig, was bei menschlichen Bewegungen auf Grund der vielen Freiheitsgrade selten der Fall ist. Daher müssen die Ergebnisse dieser Variante ebenfalls manuell Bild für Bild überprüft werden, was die Zeiterparnis in Grenzen hält.

¹⁵Matlab ist eine skriptbasierte Programmierumgebung der Firma Mathworks

4. SYSTEMENTWICKLUNG

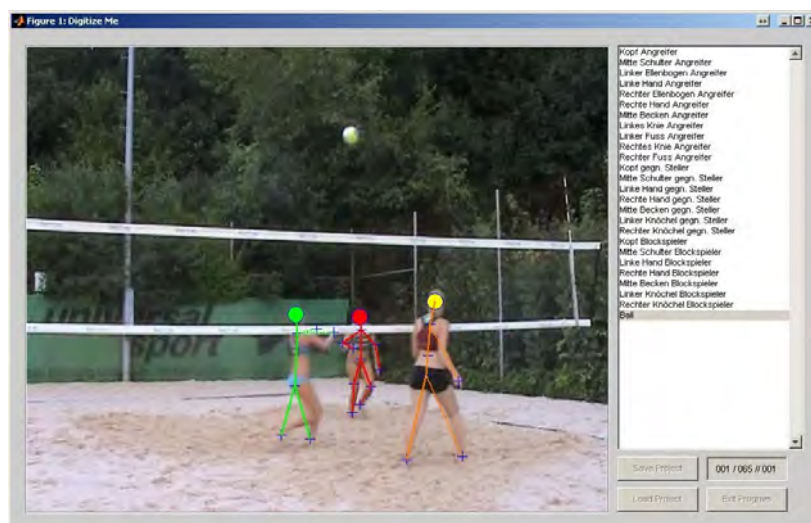


Abb. 4.17: Benutzerinterface „DigitizeMe“ zur manuellen Identifikation von Körperpunkten am Beispiel einer Beachvolleyball Aufnahme: Rechts die relevanten Punkte des Körpermodells.

Um grobe Fehler durch Verwechslung der Punkte zu vermeiden, besteht die Möglichkeit bei der Definition des Körpermodells in der Projektdatei Form und Farbe der Marker und der Verbindungslinien zu konfigurieren. Damit kann beispielsweise eine „Strichfigur“ erzeugt werden, mit der eine automatische visuelle Kontrolle möglich ist (Abb. 4.17). Darüber hinaus wurden weitere Funktionen implementiert, um Bedienfehler zu vermeiden. Zum Beispiel kann zwar das Video zu Beginn zur Identifikation eines gemeinsamen Startbildes der Digitalisierung vor- und zurückgespult werden, sobald die ersten Marker identifiziert wurden, ist dies jedoch nicht mehr möglich. Damit sollen zeitliche Inkonsistenzen in den Trajektorien vermieden werden. Die detaillierte Funktionsbeschreibung und eine Übersicht über mögliche Befehle sind im Anhang A.7 dargestellt.

Naturgemäß hängt die Genauigkeit der Auswahl der Körperpunkte von der Sichtbarkeit und Größe der Punkte im Video und der Sorgfalt des Softwarebedieners ab. Dementsprechend können keine automatische Genauigkeitsmaße bestimmt werden oder gar grobe Abweichungen detektiert werden. Das klassische Vorgehen ist die Auswertung des identischen Videomaterials mit zwei Personen (Dual-Rater-Auswertung). Damit kann die Reliabilität der bestimmten Koordinaten ermittelt werden und Ausreißer durch grobe Abweichungen identifiziert werden. Allerdings verdoppelt sich dabei der Auswerteaufwand, was bei längeren Aufnahmen mit hoher Bildrate ökonomisch kritisch zu bewerten ist. In diesem Zusammenhang wären automatische, markerlose Methoden ein großer Fortschritt für die sportwissenschaftliche Bewegungserfassung. Bis heute sind die Algorithmen jedoch noch nicht robust genug, um ohne spezielle und aufwändige Konfigu-

rationen mit wechselnden Hintergründen, Lichtänderungen, Verdeckungen sowie schnellen sportlichen Bewegungen umzugehen (vgl. Abschnitt 2.2) und werden daher in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

Nach dem Ende der Digitalisierung sind die ermittelten Trajektorien in der zugehörigen Projektdatei der Software gespeichert. Ein weiteres Softwaremodul kann bei Dual-Rater-Auswertungen zwei dieser Files einlesen und auf grobe Fehler untersuchen. Dazu werden die Koordinatenunterschiede separat für jeden Körperpunkt über alle Bilder bestimmt, da unterschiedliche Körperpunkte unterschiedlich schwierig zu lokalisieren sein könnten. Im Anschluss werden die Bilder identifiziert, in denen Unterschiede auftreten, die größer als ein einstellbares Vielfaches der Standardabweichung der betreffenden Koordinatenunterschiede sind. Aus diesen Informationen werden Projektfiles für ein drittes Rating erzeugt, die nur die relevanten Videozeitpunkte beinhalten. Auf Basis dieses Drittratings wird der grobe Fehler aus den vorhergehenden Datei identifiziert und eine Ergebnisdatei erzeugt, in dem die Mittelwerte und einfache Streuungsmaße auf Basis der zwei separaten Werte eingetragen sind.

4.2.3 Automatische Koordinatenbestimmung

Können Marker an den zu erfassenden Körperpunkten der Person(en) angebracht werden (Abb. 4.18), bieten sich aufgrund des – vor allem beim Einsatz zeitlich hochauflösender Videokameras entstehenden – Bearbeitungsaufwandes automatische Methoden zur Extraktion der Koordinaten aus dem Video- bzw. Bildmaterial an. Besonders interessant sind diese aufgrund der Möglichkeit, bereits bei der Erfassung detaillierte Unsicherheitsmaße zu berechnen, die zur Messunsicherheitsbestimmung herangezogen werden können. Im Folgenden werden die automatische Trackingmöglichkeit von retroreflektierenden Markern für eine labororientierte Anwendung des Konstanzer Kamerasystems und die Entwicklung und das Tracking aktiver LED-Marker für den Einsatz außerhalb des Labors skizziert.

Ziel aller markerbasierten Methoden ist es, das Kontrastverhältnis des jeweiligen Markers im Vergleich zum restlichen Bild zu maximieren. Grundsätzlich kann man die Markertypen nach ihrer geometrischen Form (2D, 3D) und ihren Oberflächeneigenschaften (schwarz-weiß, farbig, retroreflektierend) unterscheiden (Abb. 4.19). Durch die Wahl einer regelmäßigen geometrischen Form wird es möglich, nicht nur den Marker selbst zu identifizieren, sondern mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden eine subpixelgenaue Zentrumsbestimmung durchzuführen. Dabei kann die durch die Diskretisierung des Bildes in einzelne Pixel begrenzte Abbildungsgenauigkeit durch Interpolation der Intensitätsverteilung bis zu 20-fach gesteigert werden (West & Clarke, 1990).

4. SYSTEMENTWICKLUNG



Abb. 4.18: Hybrides Markerset aus Farbmarkern und retroreflektierenden Markern für eine Studie zum Klavierspielen (Riehle, 2012)

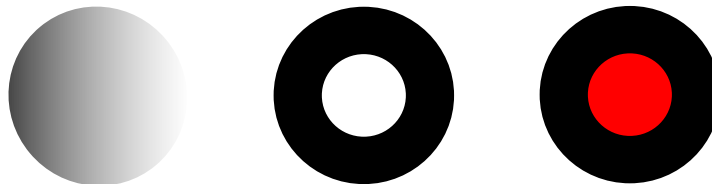


Abb. 4.19: Markertypen (schematisch): retroreflektierender Kugelmarder (links), flächiger Kontrast- (Mitte) und Farbmarker (rechts)

Am einfachsten sind zweidimensionale Farbmarker herzustellen, die jedoch den Nachteil haben, dass sie bei schräger Aufnahme auf der Bildebene als Ellipsen abgebildet werden. Da zudem die Größe der entstehenden Bildfläche je nach Winkel variiert, diese jedoch ausschlaggebend für die resultierende Genauigkeit der Zentrumsbestimmung ist, sind diese zweidimensionalen Marker für die dreidimensionale Bewegungserfassung aufgrund der vielen Winkeländerungen der Körpersegmente zur Kameraebene nur eingeschränkt geeignet.

Aufgrund seiner projektiven Forminvarianz wird der retroreflektierende Kugelmarder als ideal betrachtet und daher nicht nur in industriellen Messanwendungen, sondern z. B. auch in den Passivmarker-Infrarot-Systemen eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.1). Zur Nutzung seiner retroreflektierenden Eigenschaften muss allerdings eine parallel zur Kameraachse gerichtete Beleuchtung vorhanden sein. Von der Firma SIMI wurden dazu für das Konstanzer System LED-Ringlichter entwickelt, die einfach auf das Objektiv aufgeschoben werden können (vgl. Abb. 4.20). Da diese aufgrund des eingeschränkten Leuchtwinkels der verwendeten LEDs den gesamten *Field-of-View* der Kameras nur schlecht ausleuchten konnten, wurde eine neue Version mit einem weiteren Leuchtwinkel in den Werkstätten der Universität Konstanz gefertigt. Das Ziel einer möglichst homogenen Ausleuchtung über den ganzen Aufnahmebereich konnte jedoch auch mit dieser Version nicht erreicht werden, was zu einer schlechteren Detektion der Marker

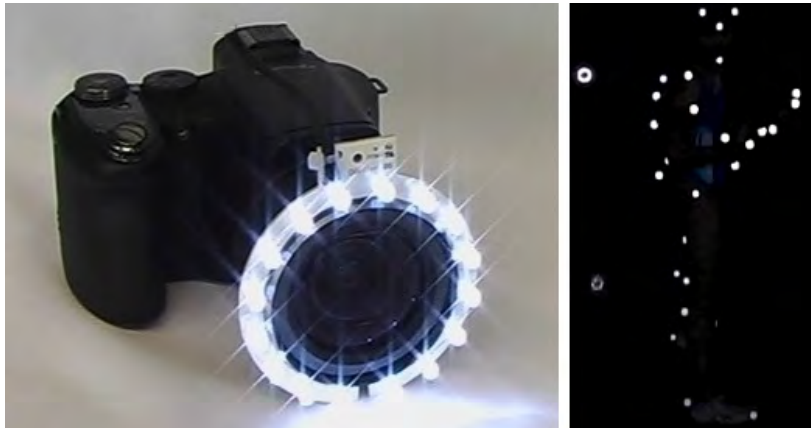


Abb. 4.20: Links: Ursprünglicher LED-Ringaufsatz zur Beleuchtung der retroreflektierenden Marker. Rechts: Bei gerichteter Beleuchtung und unempfindlicher, „unterbelichteter“ Kameraeinstellung werden lediglich die retroreflektierenden Marker deutlich abgebildet, Hintergrund und aufzunehmende Person sind kaum sichtbar. Dies erlaubt eine einfache Detektion der Marker. Am unteren Rand ist die nicht homogene Ausleuchtung des Sichtfeldes durch die LED-Ringe deutlich sichtbar.

am Rand des Aufnahmevolumens führt¹⁶. Werden die Marker in dieser Art beleuchtet, reflektieren sie das im Vergleich zur Umgebung sehr helle LED-Licht fast vollständig zurück zur Kamera. Dadurch kann diese sehr unempfindlich gestellt werden, was – neben einer Reduktion des Sensorrauschens (vgl. Abschnitt 3.1) – die Detektion der Marker günstig beeinflusst. Bei guter Kameraeinstellung werden dabei nur die retroreflektierenden Marker sichtbar (Abb. 4.20, rechts). Ist eine noch robustere Detektion notwendig, können LEDs in einem bestimmten Wellenlängenbereich mit einem dazu passenden, optischen Bandpassfilter auf den Kameras genutzt werden. Damit kann – ähnlich wie bei den Passivmarker-Infrarot-Systemen – sichergestellt werden, dass lediglich die abgebildeten Marker in den Videobildern sichtbar sind.

Für das Konstanzer System wurden die einzelnen Marker zu rigiden Markerclustern zusammengefasst (vgl. Abb. 4.21, links). Diese sind spezifisch für verschiedene Körpersegmente geformt und können im Vergleich zu direkten Gelenkmarkern Unsicherheiten bei der menschlichen Bewegungserfassung verringern (z. B. durch Minimierung des Soft-Tissue-Artifacts, vgl. Cappozzo u. a., 2005). Zudem wurde für die Kalibrationsmethode nach Svoboda u. a. (2005) ein retroreflektierender Kalibrierstab als Ersatz für den Laserpointer und ein Cluster zur Festlegung des Koordinatensystems gefertigt (vgl. Abb. 4.21, rechts).

¹⁶Die Fortschritte im Bereich der LED-Entwicklung der letzten Jahre würden dies mittlerweile ermöglichen.

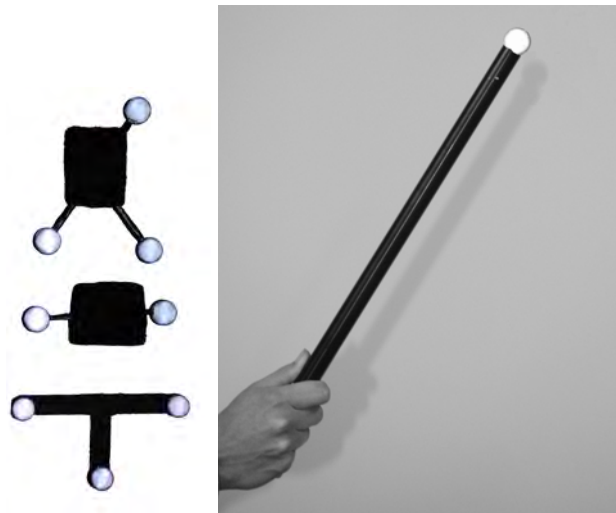


Abb. 4.21: Markerset (links) und Kalibrationsstab für die Kalibration nach Svoboda, Martinec und Pajdla (2005) (rechts)

Für die jeweilige Aufnahmesituation geeignete Markergrößen können mit der Gleichung des räumlichen Vorwärtsschnitts geschätzt werden (Gl. 3.47). Sind die Kameraparameter z. B. aus einer DLT-Kalibration bekannt, kann bei Annahme einer minimal notwendigen Bildgröße des Markers ein von Kameraabstand und Tiefe des Messvolumens abhängiger Wert für den Markerdurchmesser ermittelt werden. Die minimal notwendige Bildgröße eines Markers kann entweder durch die geforderte Genauigkeit der Zentrumsbestimmung oder als unteren Grenzwert durch die Auflösungsleistung der verwendeten Kamera bestimmt werden. Die MTF der Casio Exilim Pro EX-F1 bei einem Sechzehntel der Grenzfrequenz (vgl. Abb. 4.6) zeigt, dass dort die Kontraste über alle Zoom- und Blendeneinstellungen zu mindestens 86% abgebildet werden können. Nimmt man dies als guten Wert für die Übertragungsfunktion an, kann daraus ein minimaler Markerdurchmesser geschätzt werden¹⁷:

$$D_{Marker} = \frac{1}{\frac{1}{16}} \cdot \frac{0.35 \text{ Zyklen/px}}{2 \text{ Zyklen}} = 2.8 \text{ px} \quad (4.6)$$

Die Notwendigkeit der gerichteten Beleuchtung kann jedoch auch einen Nachteil für die flexible Bewegungserfassung darstellen. Beispielsweise müssen an allen Kamerapositionen die LED-Ringlichter mit Spannung versorgt werden. Außerdem muss das Licht die doppelte Strecke zwischen Marker und Kamera zurücklegen, was vor allem bei größeren Distanzen zu einer schlechten Aus-

¹⁷für die Grenzfrequenz wurde aus dem Diagramm MTF-10%-Corner der Minimalwert 0.35 Zyklen / Pixel entnommen, vgl. Anhang A.6.

leuchtung oder zur Notwendigkeit des Einsatzes von sehr leuchtstarken LEDs führen kann. Eine alternative Lösung besteht in der direkten Verwendung von LED-Markern, die z. B. von sehr leichten und leistungsfähigen Lithium-Polymer-Batterien versorgt werden. Diese aktiven Marker benötigen im Gegensatz zu denen der Aktivmarker-Systeme (vgl. Abschnitt 2.2.3) nicht notwendigerweise eine Verkabelung, die Bewegungseinschränkungen verursachen könnte. Für die Gewährleistung einer positions- und rotationsinvarianten Abbildung muss allerdings darauf geachtet werden, dass LEDs mit einem sehr breiten Abstrahlwinkel in Verbindung mit einem Diffusor verwendet werden. Solche Aktivmarker wurden ebenfalls in Zusammenarbeit mit den Werkstätten der Universität Konstanz entwickelt und im Rahmen einer Bewegungserfassung von Hammerwurfathleten in Kombination mit passiven Farbmarkern eingesetzt, da dort die Umgebungsbedingungen für die Verwendung retroreflektierender Passivmarker nicht geeignet waren (Abb. 4.22). In diesem Zusammenhang bietet sich darüber hinaus die Möglichkeit, farbige LEDs zu verwenden, um diese nicht nur intensitätsbasiert, sondern farbkanalbasiert auszuwerten und dadurch das Tracking zu vereinfachen oder bereits eindeutige Markercluster zu erzeugen, die im Nachhinein nicht mehr separat benannt werden müssen (vgl. Simi Reality Motion Systems GmbH, 2013).

Die Auswertemethoden der Aktivmarker unterscheiden sich prinzipiell nicht von den oben vorgestellten Methoden zur Zentrumsbestimmung retroreflektierender Passivmarker. Die bei beiden Methoden entstehenden Markerbilder können mit einfachen Schwellenwertverfahren aus dem Video extrahiert werden. Dabei sind sie aufgrund ihrer großen Helligkeitsdifferenz zum Hintergrund robust gegenüber Störungen, wie z. B. Bildrauschen. Lediglich im Fall weiterer sehr heller Objekte im Sichtfeld der Kamera (z. B. Fensterflächen, Gegenlicht oder die LED-Ringe anderer Kameras) schlägt die Detektion fehl. Aufgrund ihrer statischen Positionen können diese Objekte jedoch maskiert werden, allerdings kann die Kamera in diesen maskierten Regionen auch keine bewegten Marker mehr detektieren¹⁸.

Eine erweiterte Methode basiert auf der statistischen Bestimmung der Schwellenwerte. Dies hat den Vorteil, dass der Schwellenwert nicht manuell bestimmt werden muss, sondern aus den vorliegenden Bildinformationen ermittelt wird. Svoboda u. a. (2005) nutzen dieses Verfahren bei der Detektion des Laserpointers für die Kalibrierung (vgl. Abschnitt 3.3.3). Dabei wird für das gesamte Video durch Mittelwertbildung aller Bilder ein mittleres Bild bestimmt. Das erlaubt es ein Standardabweichungsbild durch die Abweichungen der einzelnen Bilder

¹⁸Hierzu wurde ein graphisches User-Interface entwickelt, mit dem in einem geladenen Video der Bereich mit hellen, jedoch nicht relevanten Objekten mittels eines Polygonzugs vom sensitiven Bereich getrennt werden kann.

4. SYSTEMENTWICKLUNG

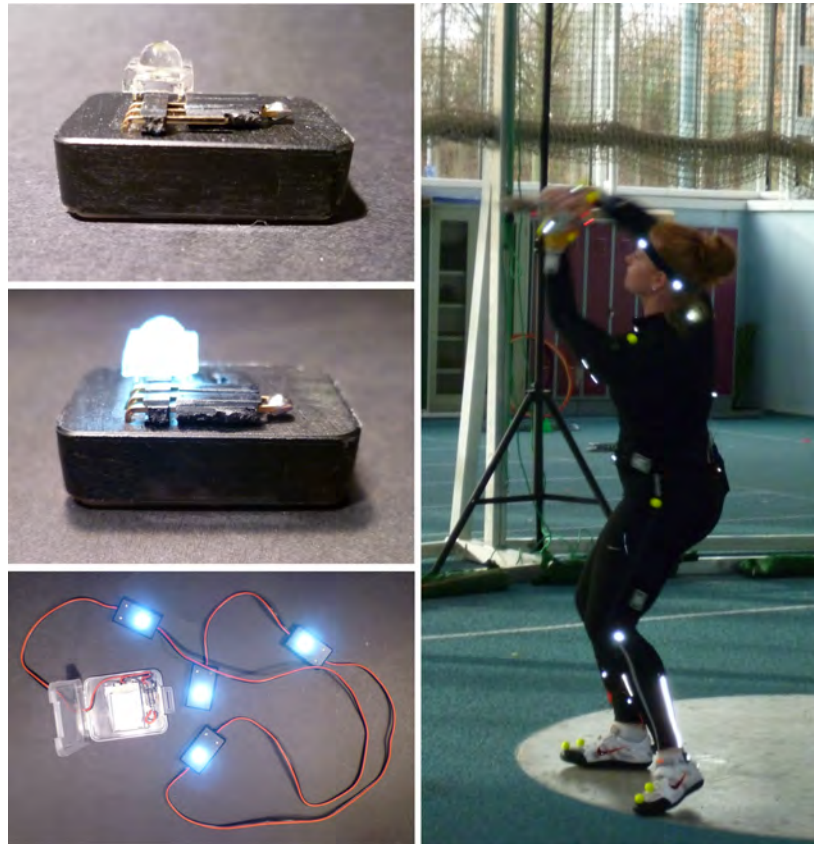


Abb. 4.22: Links: Einzelne LED-Marker und verkettetes Set. Rechts: Active Markerset in Anwendung bei der Bewegungserfassung eines Hammerwurfs (Riehle, 2012).

vom mittleren Bild zu berechnen, aus welchem eine standardabweichungsbasierte Schwelle (z. B. 3σ) zur Segmentierung abgeleitet werden kann¹⁹. Aus dieser binären Segmentierung erhält man sogenannte BLOBs (binary large objects, vgl. auch Shortis, Clarke und Short, 1994), denen abhängig von ihrer Bildposition eine eindeutige Kennzeichnung (ID) zugewiesen werden kann. Ziel ist die Bestimmung der Mittelpunkte dieser BLOBs als Repräsentation der Markerzentren (Jobbágy & Furnée, 1994). Zusätzlich können bereits auf dieser binären Stufe der Bildverarbeitung weitere Merkmale der BLOBs ermittelt werden, die dazu dienen können, die Ergebnisse der Segmentierung auf der Basis von Eigenschaften der verwendeten Marker einzuschränken.

¹⁹In der aktuellen Implementierung segmentieren Svoboda u. a. (2005) das jeweilige Differenzbild (Helligkeitswerte aktuelles Bild - Helligkeitswerte mittleres Bild) durch eine 80% Schwelle vom Maximalwert des entstehenden Bildes.



Abb. 4.23: Abb. retroreflektierender Kugelmarker im HS300-Video der Kamera Casio Exilim EX-F1 (Ausschnitt): Diskretisierung der Sphären durch die Pixelauflösung (oben), Binäre Schwellenwertbildung liefert vom Hintergrund separierte BLOBs, deren Zentren anhand der Intensitätsverteilung genauer lokalisiert werden können (unten). Am rechten Bildrand stehen zwei Marker kurz vor der Überdeckung, die anhand der Exzentrizität des entstehenden, gemeinsamen BLOB ausgefiltert werden können.

Zu diesen Merkmalen gehören zum Beispiel (vgl. auch Abb. 4.23):

- Mittelpunkt der binären Fläche
- mittlerer Radius
- Parameter einer angepassten Ellipse (Mittelpunkt, Orientierung)
- Exzentrizität - Verhältnis des großen zum kleinen Ellipsenradius
- Markerfläche

Falls weitere Informationen über die Helligkeitsverteilung des Markers (oder der LED) vorhanden sind, kann der Mittelpunkt noch genauer bestimmt werden (Baca, 1997). Dabei wird eine Region um den BLOB-Mittelpunkt aus dem ursprünglichen Bild extrahiert und z. B. bikubisch interpoliert, um eine höhere

Auflösung zu erreichen. Anschließend kann korrelationsbasiert eine Kurve der bekannten Helligkeitsverteilung angepasst und deren Zentrumskoordinaten als bester Schätzer des Markerzentrums bestimmt werden. Zu beachten sind dabei jedoch die Veränderungen der Helligkeitsverteilung durch das optische System (vgl. Abb. 3.17). Ein Anwendungsbeispiel ist die Zentrumsbestimmung der LED des Laserpointers in der Kalibrationsmethode von Svoboda u. a. (2005), das in Abb. 4.24 dargestellt ist. Die Anpassung einer Gaußfunktion als Approximation der Helligkeitsverteilung einer Punktquelle erlaubt eine Angabe der Kovarianzmatrix zum bestimmten Markerzentrum und somit einen Qualitätswert für den jeweiligen Marker. Allerdings ist dabei zu beachten, dass sich bei starker Sättigung des Markerbildes (z. B. bei starker Beleuchtung der retroreflektierenden Marker) die Gaußinterpolation schlechter verhalten kann als die einfache oder quadratische Mittelwertbildung. Dies liegt daran, dass mit der Gaußfunktion die Randpixel weniger stark in die Zentrumsbestimmung einfließen, welche jedoch im Sättigungsfall relevante Bildinformation beisteuern (Shortis u. a., 1994). Auch die im Bild 4.24 dargestellte Helligkeitsverteilung weist eine zu starke Sättigung auf, so dass die Korrelationswerte eher gering bleiben. Diese Methoden werden vor allem relevant, wenn nichtlineare Kalibrierverfahren eingesetzt werden, da Abweichungen durch nicht modellierte Verzeichnungen bei handelsüblichen Objektiven typischerweise mehr als einen Pixel betragen und damit die Rekonstruktionsabweichung dominieren (Tsai, 1987). Im vorliegenden Fall wurde eine Qualitätsmetrik $Q = (Q_x, Q_y)^T$ aus den horizontal und vertikal projizierten Achsenlängen L_x und L_y der auf das Markerbild angepassten Ellipse mit Hauptachsenlänge L und Orientierung α zur horizontalen Achse des Bildkoordinatensystems bestimmt. Diese wurden auf Basis der mittleren Helligkeit H (Wertebereich 0-255) korrigiert und können damit als Eingangsgrößen einer bivariaten Verteilungsfunktion dienen, mit der die Unsicherheit der automatischen Extraktion des Markerzentrums ausgedrückt werden kann. Die Annahmen dabei sind, dass der Mittelpunkt mit zunehmender projizierter Achsenlänge genauer geschätzt werden kann und dass ein hellerer Marker einen besseren Schätzer darstellt als ein dunklerer. Zur Normierung wird davon ausgegangen, dass bei einer projizierten Länge kleiner 1px die Genauigkeit 1px beträgt und bei einer Länge ab 7px die maximale Genauigkeit der Mittelpunktextraktion erreicht ist.

Zur Bestimmung von BLOBs bietet Matlab bereits integrierte Bildverarbeitungsroutinen, die eine schnelle Implementierung automatisierter Videoauswertungen ermöglichen. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Software bestimmt nach Angabe des zu analysierenden Videozeitraums unter Verwendung dieser Routinen pro Bild für jeden erkannten Marker eine ID sowie einen Zustandsvektor, der neben dem Kamerazentrum die Eigenschaften des BLOBs und der zugrundeliegenden Helligkeitsverteilung enthält. Da die Videos nach der Aufnahme ausgewertet werden, bestehen keine Echtzeitanforderungen und die

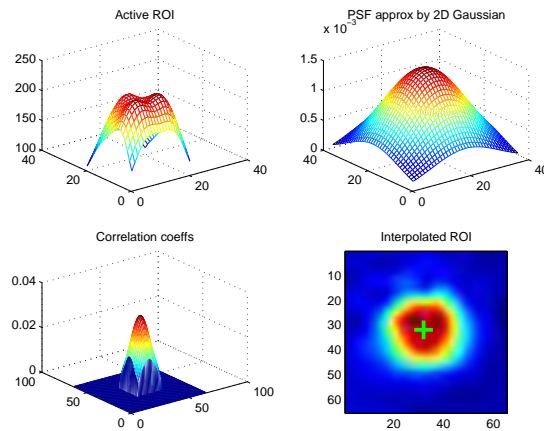


Abb. 4.24: Interpolation des entstehenden Markerbildes durch eine Gaußfunktion bei der Kalibrationsmethode nach Svoboda, Martinec und Pajdla (2005)

Rechenzeiten spielen nur eine untergeordnete Rolle. Daher sind rechenaufwändigere und damit genauere BLOB-Methoden und Subpixelinterpolationen möglich. Über Parametereinstellungen können z. B. stark exzentrische Marker von der Zuweisung ausgeschlossen werden, da diese Teilverdeckungen durch Körperteile oder am Bildrand die Zentrumsbestimmung verfälschen können (vgl. Abb. 4.23, rechter Bildrand). Zudem bietet die entwickelte Software die Möglichkeit den Erfassungsbereich im Video einzuschränken, um dadurch statische, helle Objekte (z. B. Fensterflächen, Beleuchtung oder die Ringlichter der anderen Kameras) im Vorhinein aus der Erfassung auszuschließen (vgl. Abb. 4.25). Ohne spezielle Geschwindigkeitsoptimierungen benötigt die entwickelte Software auf einem aktuellen PC für die Extraktion der Koordinaten und weiterer Zustandsvektoren von 6 Markern pro Bild im Mittel 39 ms.

4.2.4 Tracking im Bildraum

Bei der manuellen Ermittlung der Bildkoordinaten (vgl. Abschnitt 4.2) ist die Zuordnung der Koordinaten zu den einzelnen Trajektorien direkt durch die Reihenfolge der Markierung gegeben. Werden automatische Methoden eingesetzt, so müssen die in jedem Bild ermittelten BLOBs den entsprechenden Trajektorien zugeordnet werden. Ist dies bei einem einzelnen Marker trivial²⁰, wird es mit zunehmender Markeranzahl – vor allem bei nicht-rigider (menschlicher) Bewegung und vielen Verdeckungen einzelner Marker – ein anspruchsvolles Problem, das oft nicht eindeutig lösbar ist (Maas, 2005). Prinzipiell vereinfacht eine Erhöhung

²⁰Dieser Umstand wird zum Beispiel im Rahmen der Kalibrationsmethode nach Svoboda u. a. (2005) genutzt.

4. SYSTEMENTWICKLUNG

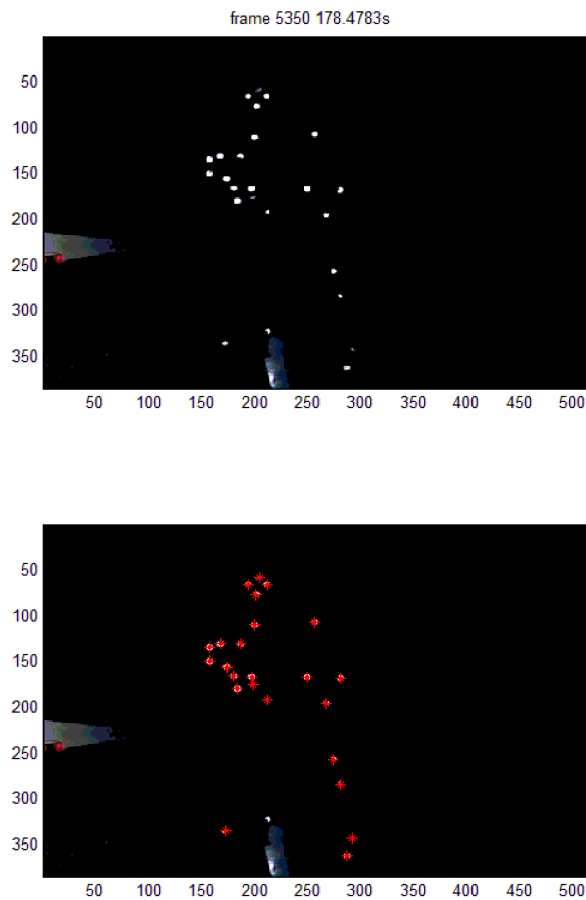


Abb. 4.25: Vollautomatische Extraktion der Markerzentren durch die entwickelte Software am Beispiel einer Tischtennisaufnahme. Durch die Einschränkung der aktiven Region (ROI) wird die Reflektion der Tischtennisplatte nicht als BLOB identifiziert.

der Videobildrate die Zuordnung, da die maximale Bewegung der einzelnen Marker von Bild zu Bild im Vergleich zu den Abständen der einzelnen Marker zueinander sinkt und somit bei genügend hoher Bildrate wiederum eine eindeutige Zuordnung auf Basis einer maximalen Geschwindigkeitsschwelle der Marker möglich wird, solange sich keine Verdeckungen oder Vereinigungen im Bildraum ereignen.

Grundsätzlich kann das Tracking wahlweise im Bild- oder im Objektraum erfolgen, wobei für die letztere Variante die Kameraparameter zur Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten bereits bekannt sein müssen. Durch das Tracking im Objektraum entfällt eine Vielzahl im Bildraum möglicher Zuordnungen. Für das Tracking im Rahmen der Bewegungserfassung mit Consumer-Kameras kann im Allgemeinen jedoch nicht von einer bekannten Kalibrierung und Orientierung aus-

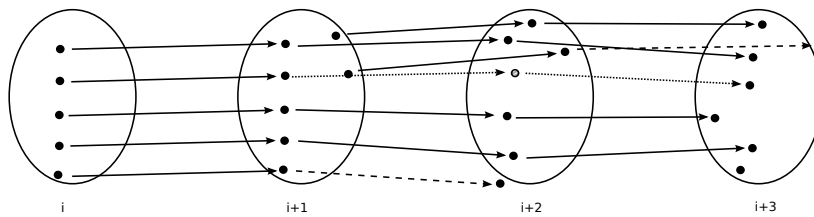


Abb. 4.26: Darstellung des Markertrackingproblems: Es müssen die Zuordnungsvorschriften gefunden werden, welche die in Bild i und Bild $i+1$ vorhandenen Marker miteinander verknüpfen (schwarze Pfeile). Dabei können in Bild i verdeckte Marker in Bild $i+1$ hinzukommen und es können bereits zugeordnete Marker (temporär) verdeckt sein (Bild $i+2$), welche bei Rückkehr ins Bild der zugehörigen Trajektorie zugewiesen werden müssen (Bild $i+1$).

gegangen werden. Daher werden im Folgenden nur Methoden für die zeitliche Zuordnung im Bildraum betrachtet. Das Problem kann dabei folgendermassen formuliert werden (vgl. Abb. 4.26):

Bekannt ist die Position von m Markern im Bild i und von n Markern im Bild $i+1$. Es müssen die Zuordnungsvorschriften gefunden werden, die die in Bild i und Bild $i+1$ vorhandenen Marker zueinander zuordnen (schwarze Pfeile). Dabei können in Bild i verdeckte Marker in Bild $i+1$ hinzukommen und es können bereits zugeordnete Marker (temporär) verdeckt sein (Bild $i+2$), welche bei Rückkehr ins Bild der originären Trajektorie zugeordnet werden müssen (Bild $i+1$).

Durch die lineare Extrapolation der Geschwindigkeit des Markers von Bild i nach Bild $i+1$ kann ein Suchfenster in Bild $i+2$ erzeugt werden, in dem der Marker vermutet wird (vgl. Blackman & Popoli, 1999). Idealerweise muss dabei die Genauigkeit der Extrapolation so groß sein, dass sich in diesem Suchfenster nur der zuzuordnende Marker oder im Fall der Verdeckung dieses Markers kein Marker befindet. Auch hier wirkt eine hohe zeitliche Auflösung der verwendeten Kamera unterstützend, da mit dieser die durch die Linearisierung der Bewegung entstehenden Fehler gering bleiben.

Betrachtet man das Problem des Trackings allgemeiner, so muss eine Extrapolation des Systemzustandes der einzelnen Marker in den nächsten Zeitschritt erfolgen, in dem die einzelnen Zustände mit den neuen Messwerten verglichen werden. Diese Systemzustände können beliebig komplex ausgedrückt werden. Beispielsweise kann zusätzlich zur Geschwindigkeit die Beschleunigung herangezogen werden. Darüber hinaus können auch weitere Eigenschaften des BLOBs oder der zugehörigen Helligkeitsverteilung verwendet werden. Anbieten würden sich dazu z. B. die absolute Helligkeit oder Flächen- und Exzentrizitätsmaße. Allerdings nimmt die Komplexität der Modellierung mit Anzahl der Merkmale zu, vor allem wenn die zugrundeliegende Dynamik nichtlinear wird. Im

Bezug auf das Tracking von Objekten in Bildern haben sich bei Annahme einer linearen Systemdynamik Kalman-Filter bewährt (Figueroa, Leite & Barros, 2003). Bei nichtlinearen Dynamiken werden erweiterte und Unscented-Kalman-Filter eingesetzt (Ringer & Lasenby, 2002). Partikel-Filter erlauben das Tracking bei nicht normalverteilten Fehlern in den Beobachtungen, da diese nach dem Prinzip der Monte-Carlo-Simulation die Systemdynamik numerisch approximieren (Uematsu & Saito, 2007). Für alle diese Filter ist es schwierig, die Trajektorien nach längeren Verdeckungen korrekt fortzusetzen. Eine weitere Variante ist daher das von Reid (1978) entwickelte Mehrfach-Hypothesen-Tracking (*Multiple-Hypothesis-Tracking*), bei welchem während des Trackings mehrere Möglichkeiten für die einzelnen Trajektorien zugelassen werden (Ringer & Lasenby, 2002). Die verschiedenen Hypothesen können dann entweder auf Basis ihrer Wahrscheinlichkeit oder im Rahmen der Rekonstruktion der dreidimensionalen Trajektorien aufgrund des entstehenden Rekonstruktionsfehlers gewählt oder verworfen werden (Blackman, 2004).

Für die Umsetzung von automatischen Trackingalgorithmen für die Bewegungserfassung mit Consumer-Kameras bietet es sich an, alle Trajektorienvarianten für die spätere dreidimensionale Rekonstruktion beizubehalten und die ungültigen Trajektorien erst danach auf Basis der entstehenden Reprojektionsabweichungen zu trennen oder zu verwerfen. Im Anschluss sollte ein manueller Nachbearbeitungsschritt vorgehalten werden, in dem zugehörige, jedoch getrennt erkannte Trajektorien manuell verknüpft werden können.

Die konkrete Implementierung für das Konstanzer System basiert auf der finalen, temporalen Zuordnungsstufe eines ursprünglich von Crocker und Grier (1996) entwickelten Algorithmus zur Extraktion von Kolloidteilchentrajektorien aus videomikroskopischem Bildmaterial. Dieser Algorithmus identifiziert die korrekte Zuordnung der Positionen eines Zeitschritts mit den Positionen eines nächsten Zeitschritts als die minimale Ortsveränderung aller Positionen und wurde in reduzierter Form von Daniel Blair und Eric Dufresne für Matlab implementiert²¹. Er bietet zudem die Möglichkeit, neben den ortsbezogenen Daten zu den einzelnen Objekten weitere Informationen über die Objekte (z. B. Größe, Helligkeit) zum Tracking zu nutzen. Für das implementierte Aktiv- und Passivmarkertracking wurden zur Definition dieses erweiterten Systemzustandes der Durchmesser, die Exzentrizität und die mittlere Helligkeit genutzt. Mit weiteren Parametern können die zur Identifikation einer Trajektorie notwendige Mindestlänge, die maximal für eine Zuordnung erlaubte Bewegung der Marker von Bild zu Bild und die maximal zur Beibehaltung der Trajektorie erlaubte Dauer einer Markerdeckung konfiguriert werden.

²¹ The Matlab Particle Tracking Code Repository, <http://physics.georgetown.edu/matlab/index.html> [09.03.2010]

4.2.5 Rolling-Shutter-Korrektur

Sind die zweidimensionalen Trajektorien ermittelt, kann der Einfluss der Rolling-Shutter-Verzögerung auf die jeweiligen Marker korrigiert werden (vgl. Abschnitt 3.2.3 und 4.1). Dazu wird für jede Markertrajektorie die Horizontalgeschwindigkeit $(x_i - x_{i-1})$ bestimmt und mit Gleichung 4.5 die aktuelle Markerposition $(x_i, y_i)^T$ zur neuen Position $(x_{\text{kRS}}, y_i)^T$ korrigiert:

$$\begin{aligned}x_{\text{kRS}} &= x_i + \Delta x_i \\x_{\text{kRS}} &= x_i + y_i \cdot m_{\text{vert}} \cdot (x_i - x_{i-1})\end{aligned}\quad (4.7)$$

Der Korrekturfaktor m_{vert} ergibt sich aus der Verzögerungszeit des Rolling-Shutters, der in den Hardwaretests in Abschnitt 4.1.5 ermittelt wurde.

4.2.6 Synchronisierung

Wie bereits in den Abschnitten 2.3 und 3.3.6 erwähnt, erzeugt die nicht vorhandene Synchronisierungsmöglichkeit der Consumer-Kameras von der jeweiligen Objektgeschwindigkeit abhängige Fehler bei der Rekonstruktion dieser Objekte. Dementsprechend ist es notwendig, die ermittelten zweidimensionalen Trajektorien vor der Rekonstruktion zu synchronisieren. Nach Carceroni, Padua, Santos und Kutulakos (2004) soll ein robuster und reliabler Synchronisierungsalgorithmus folgende Problemfälle abdecken:

- unbekannte Kamerabildraten
- beliebige Zeitabweichungen zwischen den einzelnen Videosequenzen
- beliebige Bewegungen und Geschwindigkeiten der Objekte
- unbekanntes, benutzerdefiniertes Kamerasetup
- keine statischen Punkte in den Bildern
- Probleme bei der Trajektorienzuordnung: einzelne Punkte können nicht reliabel über mehrere Frames verfolgt werden.
- unbekannte Kernliniengeometrie: relative Kameraanordnung ist nicht bekannt.
- Skalierbarkeit: auch mit steigender Anzahl an zu synchronisierenden Trajektorien soll der Algorithmus in akzeptabler Zeit berechenbar bleiben.

Im biomechanischen Anwendungsbereich haben zuerst Yeadon und King (1999) und Pourcelot, Audigié, Degueurce, Geiger und Denoix (2000) von numerischen Synchronisierungsmethoden berichtet, um Abweichungen durch die Asynchronität der Kameras zu minimieren. Dazu berechneten sie den optimalen Zeitoffset zwischen zwei Kameras, indem sie die DLT-Rekonstruktionsabweichung minimierten. Diese für Zweikamerasysteme gut geeigneten Methoden

wurde auch für das vorliegende System umgesetzt. Sobald mehrere Kameras synchronisiert werden müssen, wird jedoch die Wahl der Synchronisierungsstrategie relevant (Christopher, Yoon & Kwon, 2008). Die Autoren schlagen vor, zuerst alle Kamerapaare zu synchronisieren und zu diesen Paaren nacheinander zusätzliche Kameras hinzuzufügen, um eine global optimale Synchronität zu finden. Dazu nutzen sie eine nichtlineare Rekonstruktionsmethode (Kwon, 2005) und konnten damit die Rekonstruktionsabweichung auf weniger als 18.5% der vorher vorhandenen Abweichungen reduzieren. Ein weiterer Synchronisierungsalgorithmus transformiert die Trajektorien in den Frequenzraum, um korrelationsbasiert das Kernlinienverhalten zwischen den Kamerapaaren für eine Synchronisierung zu nutzen (Guitteny, Benosman & Charbuillet, 2008). In einem dritten Verfahren werden Rangzwangsbedingungen genutzt um die Trajektorien bildgenau auszurichten (Velipasalar & Wolf, 2008).

Generell können die in der Literatur berichteten Verfahren in fünf Kategorien eingeteilt werden:

- DLT-basierte Verfahren (Pourcelot u. a., 2000; Yeadon & King, 1999)
- Verfahren mit Rangzwangsbedingungen (Rank Constraints, Velipasalar und Wolf, 2008)
- Epipolargeometrie-basierte Verfahren (Cao u. a., 2010; Carceroni u. a., 2004; Noguchi & Kato, 2007; Padua, Carceroni, Santos & Kutulakos, 2010)
- Frequenzraum-Verfahren (Guitteny u. a., 2008)
- Bündelblockausgleich-basierte Verfahren (Lei & Yang, 2009; Raguse & Heipke, 2005, 2006)

Ein zu den letztgenannten Verfahren zugehörendes Beispiel berichten Raguse und Heipke (2005) mit einer Erweiterung des Bündelblockausgleichs (vgl. Abschnitt 3.3.3) um temporale Parameter zur Synchronisierung eines Zweikamerasystems. Dabei konnte die Rekonstruktionsabweichung um den Faktor 10 gesenkt werden. Zusätzlich bietet dieses Verfahren eine Integrationsmöglichkeit in die Messunsicherheitsbetrachtung nach GUM im Rahmen des stochastischen Modells des Bündelausgleichsverfahrens. Damit könnte auch dieses Prinzip eine gute Wahl für die Umsetzung im Konstanzer System darstellen. Unklar ist allerdings, wie stabil die Ergebnisse eines Transfers der für zwei Kameras entwickelten Lösung auf den Bündelblockausgleich eines Mehrkamerasystems sind.

Die Vorgehensweise der Modellierung der zeitlichen Asynchronität nach Raguse und Heipke (2005) basiert dabei auf der Annahme einer linearen zeitlichen Drift zwischen den beiden Kameras:

$$\Delta t_{Drift} = \frac{1}{f_{Ref}} - \frac{1}{f} \quad (4.8)$$

mit Δt_{Drift} : Drift zwischen den beiden Systemen [s]
 f_{Ref} : Aufnahmefrequenz des Referenzsystems [Hz]
 f : Aufnahmefrequenz des zu synchronisierenden Systems [Hz]

Führt man zusätzlich einen unterschiedlichen Startpunkt der Trajektorien Δt_{Offset} ein, kann die zeitliche Asynchronität zu einem Zeitpunkt t_i mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\Delta t(t_i) = \Delta t_{Offset} + (t_i - t_0) \cdot f \cdot \Delta t_{Drift} \quad (4.9)$$

mit $\Delta t(t_i)$: Asynchronität zwischen den beiden Systemen [s]
 Δt_{Offset} : Zeit-Offset zu Beginn der Aufnahme t_0 [s]

Für eine größere Asynchronität als das Zeitintervall zwischen zwei Frames führen Raguse und Heipke (2006) einen weiteren Korrekturwert n ein, mit dem die korrespondierenden Bildpunkte der Trajektorien zu einzelnen Zeitschritten zugeordnet werden können. Nach Korrektur der Trajektorien verbleibt ein reduzierter Asynchronitätswert Δt_{red} :

$$\Delta t_{red}(t_i) = \Delta t(t_i) - n \cdot \frac{1}{f} \quad (4.10)$$

$$n = \lfloor \Delta t(t_i) \cdot f \rfloor \quad (4.11)$$

Zur Erweiterung des Bündelblockausgleichs können mit dem Interpolationsfaktor der so ermittelten reduzierten Asynchronität durch lineare Interpolation synchronisierte Objektkoordinaten bestimmt und in die erweiterten Kollinearitätsgleichungen der einzelnen Kameras aufgenommen werden:

$$\Delta sync(t_i) = f \cdot \Delta t_{red}(t_i) \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \Delta X_{sync}(t_i) &= |\Delta sync(t_i)| \cdot [X(t_{i+sign(\Delta sync(t_i))}) - X(t_i)] \\ \Delta Y_{sync}(t_i) &= |\Delta sync(t_i)| \cdot [Y(t_{i+sign(\Delta sync(t_i))}) - Y(t_i)] \\ \Delta Z_{sync}(t_i) &= |\Delta sync(t_i)| \cdot [Z(t_{i+sign(\Delta sync(t_i))}) - Z(t_i)] \end{aligned} \quad (4.13)$$

4. SYSTEMENTWICKLUNG

$$\begin{aligned}x(t_i) &= x_0 - c \frac{r_{11}(X(t_i) + \Delta X_{sync}(t_i) - X_0(t_i)) + r_{21}(Y(t_i) + \Delta Y_{sync}(t_i) - Y_0(t_i)) + r_{31}(Z(t_i) + \Delta Z_{sync}(t_i) - Z_0(t_i))}{r_{13}(X(t_i) + \Delta X_{sync}(t_i) - X_0(t_i)) + r_{23}(Y(t_i) + \Delta Y_{sync}(t_i) - Y_0(t_i)) + r_{33}(Z(t_i) + \Delta Z_{sync}(t_i) - Z_0(t_i))} + \Delta x \\y(t_i) &= y_0 - c \frac{r_{12}(X(t_i) + \Delta X_{sync}(t_i) - X_0(t_i)) + r_{22}(Y(t_i) + \Delta Y_{sync}(t_i) - Y_0(t_i)) + r_{32}(Z(t_i) + \Delta Z_{sync}(t_i) - Z_0(t_i))}{r_{13}(X(t_i) + \Delta X_{sync}(t_i) - X_0(t_i)) + r_{23}(Y(t_i) + \Delta Y_{sync}(t_i) - Y_0(t_i)) + r_{33}(Z(t_i) + \Delta Z_{sync}(t_i) - Z_0(t_i))} + \Delta y\end{aligned}\tag{4.14}$$

Wichtig für eine schnelle Konvergenz des Ausgleichs scheint in jedem Fall, dass bereits gute Schätzwerte für f, f_{Ref}, n und Δt_{Offset} vorliegen. Der Faktor n wird wie von Raguse und Heipke (2006) vorgeschlagen auf 0 initialisiert und kann bei längerer Aufnahmedauer iterativ ermittelt werden. Für die Casio Exilim Pro EX-F1 Kameras können für die Bildraten die in Abschnitt 4.1 ermittelten Werte inklusive Standardabweichung herangezogen werden. Für die Bestimmung von Δt_{Offset} kann ein gemeinsamer Startzeitpunkt in allen Videos ermittelt werden, z. B. durch das Einschalten eines in allen Videos sichtbaren optischen Signals (z. B. einer LED-Leuchte). Dementsprechend müssen alle Videos nach diesem Signal abgesucht werden und das Videobild, bei dem dieses Signal das erste Mal erscheint, als Startbild markiert werden. Dafür wurde ein Matlab-User-Interface entwickelt, das die entsprechende Videodatei lädt, eine Navigation innerhalb des Videos erlaubt und die entsprechenden Framenummern für Start- und Endbilder in einer Datei abspeichert. Zur schnellen Navigation können sowohl die Abspielgeschwindigkeit verändert werden als auch blockweise vor- und zurückgesprungen werden (vgl. Abb. 4.27). Bleibt das optische Signal statisch im Video, kann die Region um dieses Signal festgelegt werden und der Startzeitpunkt analog zur Markerextraktion in Abschnitt 4.2 automatisiert bestimmt werden.

Eine einfachere Variante der Synchronisierung besteht in einer zweischrittigen Methode: In einem ersten Schritt erfolgt eine lineare Skalierung der Bildratenunterschiede auf Basis der identifizierten Start- und Endzeitpunkten der einzelnen Videosequenzen. Damit ist unter Ausschluss von sprunghaften Bildratenänderungen eine bildgenaue Synchronisierung möglich. Diese kann in Kombination mit einer Geschwindigkeitsschwelle für den Kalibrationsmarker zur approximativen Synchronisierung der Kalibrationsaufnahmen genutzt werden. Dabei dient die Geschwindigkeitsschwelle der Auswahl derjenigen Bilder aus dem Video, in denen die Markerbewegung unter einer auf Basis des ungefähren Messvolumens und der gewünschten Messunsicherheit bestimmten Schwelle liegt. Für die Synchronisierung der Bewegungserfassung selbst kann nach dem bildgenauen Synchronisieren der Aufnahmen iterativ mittels Optimierung der Rekonstruktionsabweichungen ein Intra-Frame-Offset ermittelt werden (ähnlich der oben vorgestellten Methoden von Christopher u. a., 2008; Yeadon und King, 1999).

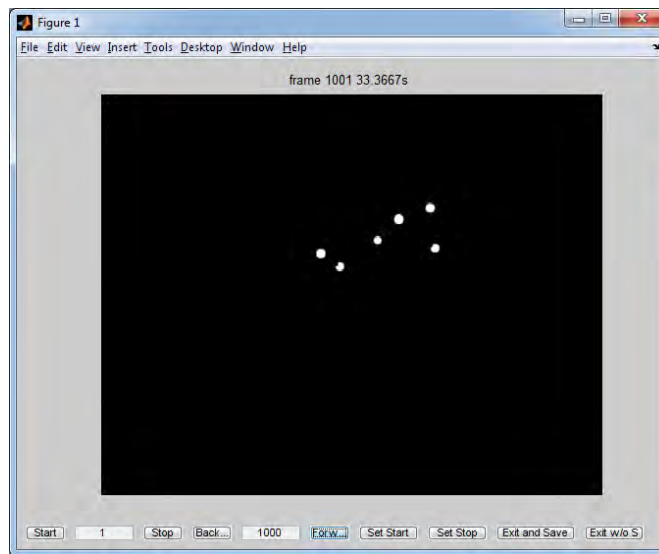


Abb. 4.27: Matlab Interface zur Identifikation von Start- und Endzeitpunkten

4.2.7 Rekonstruktion

Bei mehreren Markern pro Videobild müssen vor der dreidimensionalen Rekonstruktion die korrespondierenden Trajektorien bestimmt werden. Bei manueller Ermittlung der Bildpunkte ist dies bereits durch die Bearbeitungsreihenfolge gegeben (vgl. Abschnitt 4.2). Daher kann die Rekonstruktion direkt – z. B. mit den in Abschnitt 3.3.6 vorgestellten Least-Squares-Ansätzen – erfolgen. Zur Genauigkeitssteigerung kann die dabei entstehende DLT-Rekonstruktionsabweichung auf Basis einer zeitlichen Verschiebung einander zugeordneter Markerdaten numerisch minimiert werden (vgl. Abschnitt 4.2.6). Ein Vergleich der resultierenden Rekonstruktionsabweichung mit den bei der Kalibrierung und Orientierung ermittelten Rekonstruktionsabweichungen ermöglicht die Aufdeckung grober Fehler.

Eine Überprüfung der Zuordnung automatisiert gewonnener Trajektorien gestaltet sich komplexer: Aus der Vielzahl der hypothetischen zweidimensionalen Trajektorien (vgl. Abschnitt 4.2.4) müssen die wahren und korrespondierenden Trajektorien ermittelt werden. Dazu können in einem ersten Schritt die bei der Kalibrierung und Synchronisierung gewonnenen Näherungswerte für die Kamera- und Verzeichnungsparameter und zeitlichen Offsets genutzt werden, um potentielle Objekttrajektorien zu erstellen. Auf Basis eines Vergleichs der ermittelten Kalibrationsabweichung mit den Rekonstruktionsabweichungen der Trajektorien können in einem zweiten Schritt fehlerhafte Trajektorien ausgeschlossen werden. Alternativ können kernlinienbasierte Verfahren zur Korrespondenzsuche verwendet werden (Maas, 1991). Dabei werden die zwischen zwei (festen) Kameras

bestehenden geometrischen Abhängigkeiten genutzt, um die Suche nach korrespondierenden Trajektorien zu vereinfachen. Sind die Kameraparameter zumindest näherungsweise bekannt, so kann die Trajektorie einer Kamera in den Bildraum der anderen Kamera transformiert werden und dort mit der euklidischen Distanz zur anderen Trajektorie ein Fehlermaß gebildet werden. Übersteigt dieses eine von der ermittelten Rekonstruktionsgenauigkeit und der Genauigkeit der zeitlichen Synchronisierung abhängige Schwelle, wird diese Trajektorienzuordnung verworfen. Durch die Hinzunahme einer dritten Kamera kann die Fehleranfälligkeit dieses Prinzips noch verringert werden, da dadurch zusätzlich unterschiedliche, aber komplett in der Epipolarebene verlaufende Trajektorien unterschieden werden könnten. Dieser Fall tritt bei der menschlichen Bewegungserfassung typischerweise nicht auf und wird daher nicht implementiert.

Sind die Kameraparameter nicht bekannt, können die Fundamentalmatrizen aus den zeitlich korrespondierenden Punkten aller zuzuordnenden Trajektorien zwischen zwei Kameras gewonnen werden. Alle wirklich korrespondierenden Trajektorien sollten bis auf die Bestimmungsungenauigkeit identische Fundamentalmatrizen ergeben, während alle anderen Trajektorienkombinationen voneinander unterschiedliche Fundamentalmatrizen ergeben sollten. Somit können die korrespondierenden Trajektorien auf Basis der am häufigsten auftretenden Fundamentalmatrix ausgewählt werden. Dieses Verfahren bietet in Verbindung mit dem RANSAC-Verfahren (Fischler & Bolles, 1981) ein robustes Korrespondenzschätzverfahren ohne Kenntnis der Kameraparameter (Hartley & Zisserman, 2004). Lee und Kim (2007) lösen die dazu notwendige Schwellendefinition durch eine Fuzzy-Klassifizierung der Daten auf Basis der entstehenden Abweichungen, einem Bestimmen der maximal erreichbaren Güte und einer finalen RANSAC-Auswahlstufe der korrekten Zuordnung.

Nach Ausschluss aller fehlerhaften Trajektorien können die verbleibenden Trajektorien in einer Ausgleichsrechnung nach Abschnitt 3.3.3 mit Aufnahme der Parameter für die zeitliche Asynchronität (vgl. Abschnitt 4.2.4) verfeinert werden. In einem Nachbearbeitungsschritt kann der in Abschnitt 4.2.4 beschriebene Trackingalgorithmus auf die so gewonnenen dreidimensionalen Trajektorien angewendet werden und somit im Zweidimensionalen getrennt identifizierte Trajektorien verknüpft werden. Zum Abschluss erfolgt ein manueller Bearbeitungsschritt, in dem zum einen noch getrennte aber zugehörige Trajektorien verknüpft werden können, zum anderen aber auch eindeutige Namen für die einzelnen Trajektorien vergeben werden können. Dieser Schritt kann bei Verwendung eindeutiger Markercluster auch automatisiert werden (Schwald, 2005).

4.2.8 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden die neben der Kameramodellierung relevanten Aspekte der dreidimensionalen Bewegungserfassung mit Consumer-Kameras dargestellt. Diese können in Aspekte der Bildpunktbestimmung der zu rekonstruierenden Körperpunkte, Aspekte der zeitlichen Zuordnung dieser Einzelwerte zu zweidimensionalen Trajektorien und deren Synchronisierung auf eine gemeinsame Zeitbasis, sowie Methoden der Rekonstruktion der dreidimensionalen Objekttrajektorien unterteilt werden. Teilweise wurden auch bereits Details der implementierten Methoden für das Konstanzer System vorgestellt, die in folgenden Auswertemodulen zusammengefasst sind:

- Das graphische Benutzerinterface für die Bestimmung der „Regions-Of-Interest“ zur Ausblendung heller Objekte für die automatische Detektion von Markern
- Das graphische Benutzerinterface für die Identifikation von Start- und Endframes zur bildgenauen Synchronisierung der einzelnen Videosequenzen
- Das graphische Benutzerinterface *DigitizeMe* für die manuelle Extraktion von Körperpunkten
- Die Skripte zur Ermittlung von Unterschieden bei Dual-Rater-Auswertungen, zur Bestimmung von Diritrating-Projektdateien für *DigitizeMe* und zur Ermittlung der resultierenden Koordinatenwerte inklusive Streuungsmaßen
- Das Skript zum vollautomatischen Extrahieren der Markerpositionen und der zugehörigen Streuungsmaße aus den Videos
- Das Skript zur Trajektorienbestimmung aus den Zustandsvektoren einzelner Marker
- Das Skript zur Korrektur der Rolling-Shutter-Effekte
- Das Skript zum splinebasierten Glätten der einzelnen Trajektorien auf Basis der Erfassungsunsicherheit
- Das Skript zur Neuberechnung der Trajektorienkoordinaten aus den Trajektoriensplines zur Synchronisierung der Abtastzeitpunkte
- Das graphische Benutzerinterface zur Verknüpfung zugehöriger, aber getrennt erkannter dreidimensionaler Trajektorien
- Das graphische Benutzerinterface zur Benennung und zum Export dieser Trajektorien in verschiedene Dateiformate (Microsoft Excel, Textdateien, C3D-Dateien).

Je nach Anwendungsfall ergeben sich aus den Auswertemodulen und den verwendeten Kameramodellierungsmethoden unterschiedliche Messprozesse (vgl. Abschnitt 2.3). Im nächsten Abschnitt werden die implementierten Kameramodellierungsmethoden und die durchgeführten Simulationen und sowie Verifikations- und Validierungstests beschrieben.

4.3 Implementierung und Test

In einem ersten Schritt wurde eine Simulationsumgebung in Mathworks Matlab²² implementiert, die es zum einen erlaubt, die korrekte Implementierung der Verfahren auf Basis synthetischer Datensätze zu verifizieren. Zum anderen können Einflüsse von systematischen und zufälligen Abweichungen der Eingangsgrößen auf das Ergebnis bestimmt werden. Konkret wurden dort folgende Modellierungsansätze implementiert (Details siehe Abschnitt 3.3):

- DLT (DLT11) in homogener und inhomogener Form
- MDLT mit Orthogonal-Korrektur der Rotationsmatrizen (MDLT11)
- DLT mit Berücksichtigung von Verzeichnungsparametern (unter Benutzung der von Bouguet (1999) entwickelten „Camera Calibration Toolbox“)
- MDLT mit Berücksichtigung von Verzeichnungsparametern
- Bündelausgleichsverfahren zum nachträglichen Ausgleich der mit den DLT-Methoden ermittelten Kameraparameter (auf Basis der von Lee 2008 bereitgestellten „VLG Toolbox“²³)

Innerhalb dieser Simulationsumgebung wurde das System im Labor der Universität Konstanz mit vier synthetischen, ideal zentralprojektiven Kameras modelliert (Abb. 4.28). Für diesen Anwendungsfall wurden unter anderem auch die Effekte von systematischen und zufälligen Abweichungen in Passpunkt- und Bildkoordinaten bei der Referenzrahmenkalibration auf die dreidimensionale Rekonstruktion untersucht. Diese konnten durch die Simulation isoliert von weiteren durch eine reale Kamera hervorgerufenen Abweichungen analysiert werden. Nach Projektion der Passpunktkoordinaten in die jeweiligen Kameras wurden dazu mit den unterschiedlichen, oben genannten Modellierungsverfahren die Kameras kalibriert und orientiert. In einem nächsten Schritt wurden die Unterschiede der Rekonstruktionsabweichungen von zur Kalibration und nicht zur Kalibration genutzten Passpunkten ausgewertet. Diese sind relevant, da die Rekonstruktionsabweichung als ein Prädiktor für die spätere Systemgenauigkeit gesehen werden kann (vgl. Abschnitt 3.3.7). Anschließend wurde ein 300 mm langer Stab an zufällig im Messvolumen verteilten Positionen simuliert und zum Erhalt der Bildpunkte in die einzelnen Kameras projiziert. Durch Anwendung des räumlichen Vorwärtsschnitts (vgl. Abschnitt 3.3.6) konnten die dreidimensionalen Positionen des Stabes mit unterschiedlich vielen Kameras rekonstruiert werden und die dabei entstehenden Abweichungen von der Stablänge ausgewertet werden (vgl. Abb. 4.29). Zudem wurde der Einfluss von Ungenauigkeiten bei der Bildkoordinatenbestimmung untersucht. Die dadurch gewonnenen Daten dienen als Referenz zur Validierung der Systemanordnung im Konstanzer Labor.

²²Version 7.7 (R2008b)

²³Vision Lab Geometry Library, <http://vision.ucla.edu/vlg/> [23.09.2010]

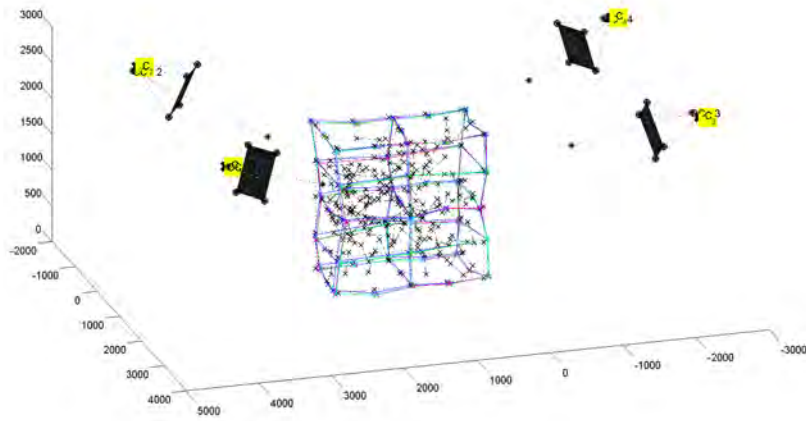


Abb. 4.28: Simulation der Konstanzer Laborsituation mit vier Kameras zum Test der Referenzrahmenkalibration mit unterschiedlichen DLT-Implementierungen. Simulierte Abweichungen auf unterschiedlichen Prozessstufen verursachen die dargestellten Rekonstruktionsabweichungen.

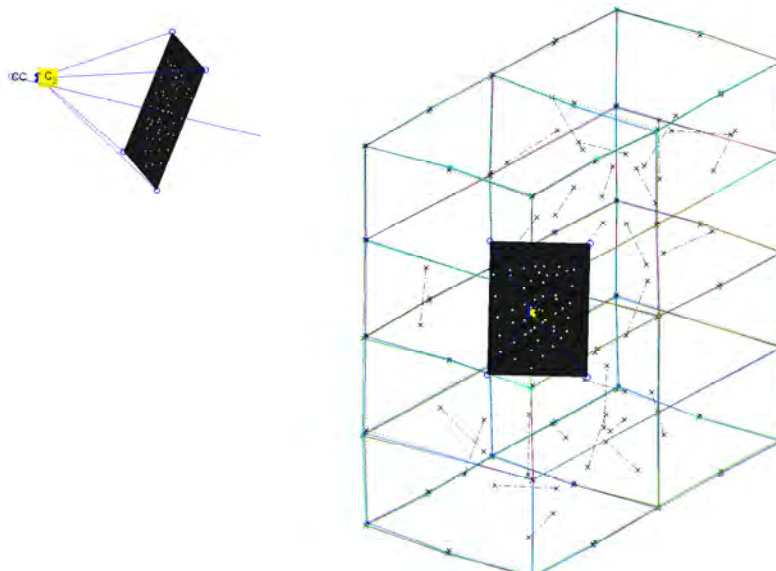


Abb. 4.29: Rekonstruktion eines Stabes mit 300 mm Länge an zufälligen Positionen innerhalb des Messvolumens (Referenzrahmens) von Kamera 1 aus betrachtet

In einem nächsten Schritt wurden die in der Simulationsumgebung implementierten Verfahren zur Bearbeitung realer Datensätze genutzt. Mit den im Abschnitt 4.2 vorgestellten Benutzerinterfaces konnten die Bildpunkte eines Referenzrahmens digitalisiert werden, der zuvor im Konstanzer Labor mit den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Kameras aufgezeichnet wurde. Anhand dieser Datensätze wurden die Kamera- und Verzeichnungsparameter mit der „Camera Calibration Toolbox“ bestimmt (Bouguet, 1999). Die dabei erhaltenen Kameraparameter dienen im weiteren Verlauf der Implementierung als Referenzdaten für die erreichbare Kalibrationsgenauigkeit des Konstanzer Systems ohne Verwendung weiterer Ausgleichsverfahren.

Wie schon in Abschnitt 2.3 erwähnt, bringt die Referenzrahmenkalibration eine Reihe von Schwierigkeiten mit sich. Das eingeschränkte Messvolumen, der umständliche Transport sowie die mit zunehmender Größe des Referenzrahmens immer schwieriger einzuhaltenen Genauigkeitsanforderungen und die meist manuell zu digitalisierenden Passpunkte sprechen gegen eine Anwendung dieses Verfahrens für die Bewegungserfassung. Daher wurde in einem anschließenden Schritt das von Svoboda u. a. (2005) entwickelte Matlab-Modul zur Kalibrierung von Mehrkamarasystemen an die implementierte Softwarearchitektur angepasst (vgl. Abschnitt 3.3.4). Da zur Verzeichnungskorrektur und Bestimmung der Kameraparameter diese Software ebenfalls auf die von Bouguet (1999) entwickelte „Camera Calibration Toolbox“ zurückgreift, können die bei der Referenzrahmenkalibration bestimmten Parameter mit den hier ermittelten verglichen werden. Neben den Einzelwerten der Parameter werden zudem Parameterunsicherheiten ausgegeben (dreifache Standardabweichung der numerischen Werte, vgl. Bouguet, 1999), die für die Einschätzung der Kalibrationsgüte und -reliabilität genutzt werden können.

Zur Verifikation der Implementierung, zur Validierung der Funktionalität und zum Vergleich der Genauigkeit wurde die identische Systemanordnung mit vier Kameras genutzt wie zuvor bei der Referenzrahmenkalibration. Direkt nach der Videoaufnahme des Referenzrahmens wurde dazu zusätzlich ein retroreflektierender Kalibrierstab (Abb. 4.21) durch das gleiche Messvolumen bewegt. Im Anschluss erfolgte eine Maßstabsbestimmung anhand eines Kalibrierobjektes mit bekannten Abständen zwischen den Markern (Abb. 4.30). Um eine bildgenaue Synchronisierung der Videos zu ermöglichen (Abschnitt 4.2.6), wurde von Beginn bis Ende jeder Aufzeichnung eine in allen Videodateien sichtbare LED eingeschaltet. Die Bildpositionen des Kalibrierstabs wurden mit den entwickelten Softwareroutinen automatisch aus den Videos extrahiert und anschließend in der Selbstkalibrationsmethode verarbeitet (Abb. 4.31). Durch die zeitnahen Aufnahmen von Referenzrahmen und Kalibrierstab können auch hier die Ergebnisse der Kalibrationsmethoden untereinander verglichen werden.



Abb. 4.30: Angepasstes Kalibrierobjekt für die Maßstabsbestimmung und Orientierung des Laborkoordinatensystems zur Kalibration nach Svoboda, Martinec und Pajdla (2005)

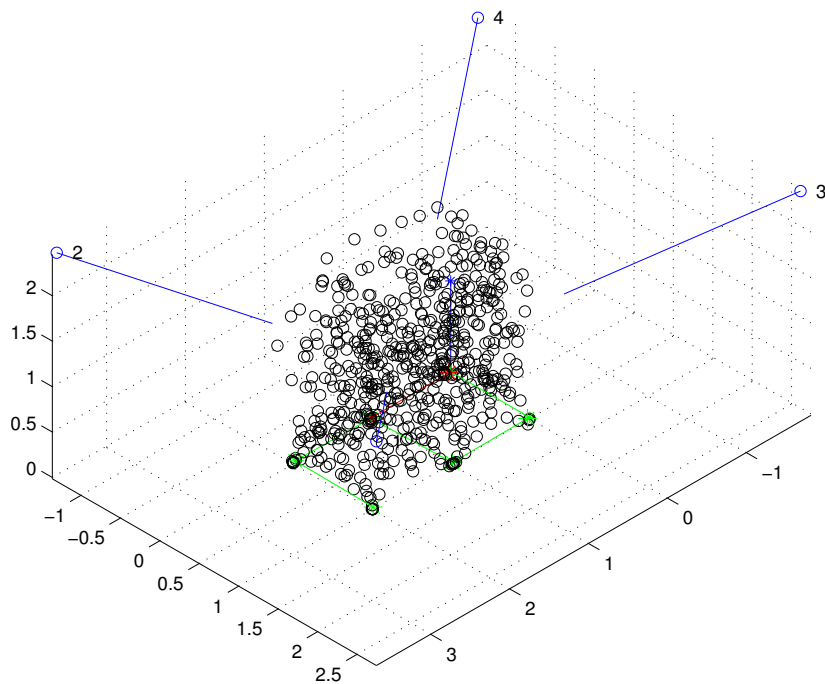


Abb. 4.31: Zur Selbstkalibration genutzte Kalibrierstabkoordinaten innerhalb des ursprünglichen Messvolumens des Referenzrahmens: Skalierungspunkte (grün), Laborkoordinatensystem (rot, grün, blau) und rekonstruierte Kamerapositionen und -orientierungen (blau), Einheit in Metern.

4. SYSTEMENTWICKLUNG

In einem weiteren Schritt wurden auf Basis der so ermittelten Modellparameter Rekonstruktionen von im Messvolumen bewegten Markerclustern betrachtet. Aufgrund der Rigidität der Markercluster konnten anhand der bekannten Markerabstände die Rekonstruktionsabweichungen bestimmt werden. Darüber hinaus war es das Ziel, die entwickelten Skripte zur Bestimmung der Start- und Endzeitpunkte und zur automatischen Markerextraktion zu überprüfen und den Einfluss der verbleibenden Asynchronität der Aufnahmezeitpunkte auf die Messabweichungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Objektgeschwindigkeit zu bestimmen. Ziel dieser Tests ist zum einen die Überprüfung, ob die bei der DLT-Kalibration ermittelten Rekonstruktionsabweichungen auch für asynchron erfassende Consumer-Kameras mit nachträglicher Softwaresynchronisierung ein valides Maß für die Messunsicherheit der Bewegungserfassung darstellen. Zum anderen soll ein solches Maß für die Genauigkeit der dynamischen Kalibrationsmethode nach Svoboda u. a. (2005) gefunden werden, da dort keine Passpunkte vorhanden sind, für die eine Rekonstruktionsabweichung wie bei der DLT bestimmt werden könnte.

Zum Abschluss erfolgt eine externe Validierungsmessung durch einen Vergleich mit dem VICON-System des Instituts für Sportwissenschaft der Universität Bern. Dazu wurde das Konstanzer System mit 4 Kameras innerhalb des Messvolumens des 10-Kamera-VICON-Systems aufgebaut (Abb. 4.32). Beide Systeme können retroreflektierende Marker verfolgen und erlauben daher bei überdeckenden Messvolumen eine gleichzeitige Erfassung derselben Marker. Da ein gemeinsames Koordinatensystem anhand der vorherigen Vermessung der Nullpunktmarker für das Konstanzer System (Abb. 4.33, rechts) erzeugt wurde, konnten zudem die rekonstruierten Trajektorien direkt miteinander verglichen werden. Mit einer erweiterten Messunsicherheit des VICON-Systems von 0.409 mm (Lüthi, 2010), bietet dies die Möglichkeit der Validierung der Kalibration anhand eines Vergleichs der rekonstruierten Positionen des Kalibrationsstabs (Abb. 4.33, links). Abschließend soll überprüft werden, ob das System auch im Anwendungsumfeld funktionsfähig ist und die erwarteten Ergebnisse erzielen kann. Dazu wird eine Armbeugebewegung erfasst und aus den Markerclustern der Verlauf des Unterarmflexionswinkels bestimmt (vgl. Abb. 4.34).



Abb. 4.32: System-Validierungsmessung mit VICON: Die überlappenden Messvolumen erlauben die zeitgleiche Aufzeichnung retroreflektierender Marker mit beiden Bewegungserfassungssystemen.

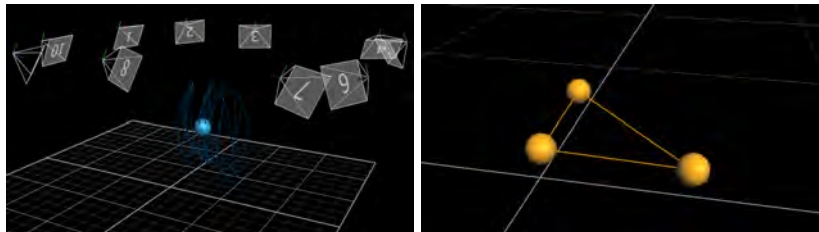


Abb. 4.33: VICON Rekonstruktion der Kalibrierbewegung (links) und Rekonstruktion des Skalierungsmaßstabs zur Koordinatensystembestimmung (rechts). Durch die Übernahme der Koordinaten für die Skalierung des Konstanzer Systems können die aufgezeichneten Trajektorien miteinander verglichen werden.

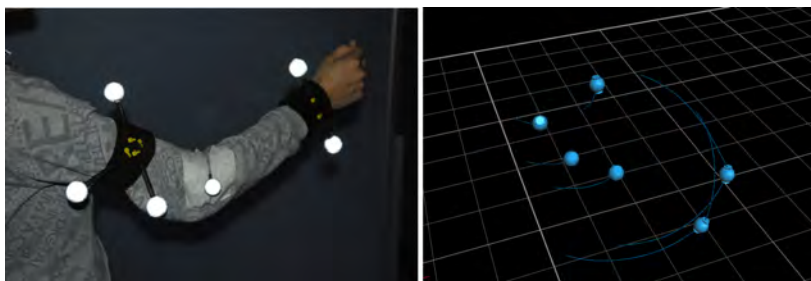


Abb. 4.34: Verwendete Markercluster zur Berechnung der Armposition und des Unterarmflexionswinkels und VICON-Rekonstruktion der Bewegung

4.4 Messunsicherheitsbestimmung

Im vorliegenden Abschnitt erfolgt die Messunsicherheitsbetrachtung der beschriebenen Systemvarianten nach dem im GUM beschriebenen Vorgehen (vgl. Abb. 2.8). Dazu wird in einem ersten Schritt die finale Messgröße als die dreidimensionale Trajektorienmatrix $T = (t, n, k)^T$ definiert (vgl. Abschnitt 2.5). Dabei wird davon ausgegangen, dass zwischen den einzelnen zeitlich aufeinanderfolgenden Messungen keine unsicherheitsrelevanten Abhängigkeiten bestehen. Dies kann angenommen werden, da die implementierte zweidimensionale Trajektorienbestimmung alle Trajektorienvarianten ermittelt und erst bei der Rekonstruktion bzw. beim dreidimensionalen Tracking eine Reduktion erfolgt. Würde diese bereits im 2D-Tracking erfolgen, müssten die rekonstruierten Einzeltrajektorien bei Fehlzuordnungen aufgespalten und wieder verknüpft werden. Demzufolge wären weitere Abhängigkeiten im Ergebnis zu betrachten. Als Beispiel kann die Rolling-Shutter-Korrektur angeführt werden, deren Betrag von der aktuellen Geschwindigkeit eines Markers abhängt. Bei nachträglichen Trajektorienanpassungen müsste dieser Betrag aus der neuen Markergeschwindigkeit berechnet werden, was aufgrund der dadurch geänderten Bildkoordinaten eine erneute Rekonstruktion zur Folge hätte und daher nicht zielführend wäre. Aus der genannten Vereinfachung leitet sich für die Charakterisierung der Messunsicherheit die Zuordnung einer 3x3 Kovarianzmatrix für die räumlichen Koordinaten pro Zeitpunkt ab. Da dadurch auch die Abhängigkeiten der einzelnen Dimensionen untereinander betrachtet werden, ergeben sich die im Abschnitt 2.4.2 beschriebenen, für den vorliegenden Fall dreidimensionalen, ellipsoiden Konfidenzregionen. Alternativ kann bei unabhängiger Betrachtung der Unsicherheiten der einzelnen Dimensionen eine 3x1 Matrix zugeordnet werden (Abschnitt 2.4.2). Diese aufgrund der typischerweise größeren resultierenden Konfidenzregionen konservativere Betrachtung erlaubt es, für den vorliegenden dreidimensionalen Fall eine quaderförmige Konfidenzregion zu bestimmen. Die durch die Asynchronität der einzelnen Kameraaufnahmen hervorgerufenen zeitlichen Fehler können bereits bei der Bestimmung der Kovarianzmatrizen der einzelnen Bildkoordinaten berücksichtigt werden. Demnach ist der einzig verbleibende Unsicherheitsfaktor für die temporale Dimension der Trajektorienmatrix die Unsicherheit der Bildrate der verwendeten Videokameras. Diese kann direkt aus zuvor durchgeführten Hardwaretests extrahiert werden und der zeitlichen Dimension der Trajektorienmatrix zugeordnet werden.

In einem zweiten Schritt werden die unsicherheitsrelevanten Eingangsgrößen identifiziert (vgl. Abb. 2.8). Diese hängen zum einen von den verwendeten Kameras und der Genauigkeit der Bildpunktbestimmung, zum anderen aber von den verwendeten Kalibrations- und Rekonstruktionsalgorithmen ab. Daher werden die unsicherheitsrelevanten Eingangsgrößen für die im Abschnitt 4.3 beschrie-

benen Systemvarianten im Folgenden getrennt betrachtet. Dazu bietet die Vorgehensweise nach GUM an, mehrstufige Messprozesse zu separieren und die in den vorgehenden Stufen ermittelten Verteilungsgrößen als Eingangsgrößen der nachfolgenden Stufen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.4.2). Im vorliegenden Fall erfolgt daher eine Einteilung des Messprozesses in eine Kalibrations- und Orientierungsphase²⁴ und eine Bewegungserfassungsphase. Die neben der finalen Messgröße T relevanten Zwischengrößen bestehen aus den in der Kalibrationsphase ermittelten und dementsprechend für die Bewegungserfassungsphase unsicherheitsrelevanten Kameraparametern inklusive eventuell bestimmter Verzeichnungsparameter. Alternativ soll geprüft werden, ob die bei der Kalibration ermittelten Rekonstruktions- und Reprojektionsabweichungen bereits ein valides Maß für die Messunsicherheit in der Bewegungserfassungsphase darstellen. Im weiteren Verlauf des Abschnitts wird zuerst die Kalibrationsphase am Beispiel der Referenzrahmenkalibration und der dynamischen Kalibration nach Svoboda u. a. (2005) betrachtet. Danach erfolgt die Betrachtung der Bewegungserfassungsphase, bevor zum Abschluss die beim dreidimensionalen Tracking entstehenden Unsicherheiten untersucht werden.

Für die Kalibrationsphase einer Referenzrahmenkalibration bestehen die unsicherheitsrelevanten Eingangsgrößen lediglich aus den Passpunktkoordinaten des Referenzrahmens und den erfassten Bildkoordinaten²⁵. Dabei können sowohl die Unsicherheiten der Vektorelemente der beiden Größen als auch die der Größen untereinander als nicht korreliert angenommen werden (Schritt 3 der Unsicherheitsevaluation, Abb. 2.8), da die Messungen mit zwei unterschiedlichen Systemen erfolgen. Die Unsicherheiten der Passpunkte des Referenzrahmens können nur durch externe Referenzmessungen bestimmt werden. Für den Konstanzer Referenzrahmen war dies nur durch manuelle Messungen mit Senkblei und Zentimetermass möglich. Die eingeschränkte Genauigkeit dieser Messungen reicht jedoch bereits aus, da die Variationen durch wiederholten Auf- und Abbau des Referenzrahmens und durch die Digitalisierung der schlecht zu identifizierenden Passpunkte als wesentlich größer einzuschätzen sind. Die Genauigkeit der Bildpunkterfassung kann anhand von Wiederholungsmessungen oder durch die Nutzung automatisierter Methoden bestimmt werden (vgl. Abschnitt 4.2). Aufgrund der statischen Aufnahme kommen dabei keine weiteren Effekte durch die verwendeten Kameras zum Tragen.

Der mathematische Zusammenhang zwischen Eingangs- und Messgrößen wird durch die DLT- bzw. Kollinearitätsgleichungen (Gl. 3.21 und 3.26) und die Gleichungen für die Verzeichnungskorrekturen (Gl. 3.24 und 3.18) beschrie-

²⁴im Folgenden kurz als *Kalibrationsphase* bezeichnet

²⁵Einflüsse durch Rechengenauigkeiten der numerischen Methoden werden unter Annahme der korrekten Implementierung aufgrund ihres geringen Einflusses auf die Genauigkeit des Messsystems nicht betrachtet.

ben. Diese Gleichungen sind aufgrund der Überbestimmung durch mehr als die zur eindeutigen Lösung notwendigen Passpunkt-Bildpunktkorrespondenzen und den vorhandenen Ungenauigkeiten in den Beobachtungswerten nur in impliziter Form – z. B. mit Least-Squares-Verfahren – lösbar (vgl. Abschnitt 3.3.1). Diese Art der Messmodelle ist in den bis jetzt erschienen GUM-Dokumenten jedoch nicht behandelt. Aufgrund der messmethodischen Relevanz solcher Verfahren wird allerdings bereits an einer diesbezüglichen Erweiterung des GUM gearbeitet. Dementsprechend ist hier keine Vorgehensweise vorgegeben. Allerdings erfolgt auch hier eine Regression des durch die Überbestimmung und die vorhandenen Messabweichungen nichtlinearen Zusammenhanges auf den linearen Zusammenhang der DLT-Gleichung (Gl. 3.21). Dementsprechend können aus den Residuen des Least-Squares-Verfahrens die Kovarianzmatrizen der DLT-Parameter bestimmt werden. Diese können als Eingangsgrößen für die Unsicherheitsbetrachtung der Bewegungserfassungsphase verwendet werden. Für die Unsicherheitsbestimmung der DLT-Methode wurde die freie Software unCLIB der METAS²⁶ genutzt. Diese bietet mit der Integration in Matlab eine sehr gute Ergänzung zu den implementierten Kalibrations- und Rekonstruktionsmethoden. Die Unsicherheitsverteilungen der Ausgangsgrößen mussten jedoch aufgrund nicht implementierter numerischer Verfahren zur Lösung homogener linearer Gleichungssysteme selbst bestimmt werden. Dazu wurden die Residuen des Least-Squares-Verfahrens für die DLT-Parameter ermittelt und zu einer empirischen Kovarianzmatrix umgeformt. Aus dieser können für die weiteren Berechnungen unsicherheitsbehaftete Größen erstellt werden.

Die nichtlinearen Varianten erfordern eine Linearisierung des Messmodells durch Taylorreihen-Approximation oder die Nutzung einer Monte-Carlo-Methode (vgl. Abschnitt 2.4.2). Die Sensitivitätskoeffizienten können durch analytische oder numerische partielle Ableitung dieses linearisierten Messmodells nach den Eingangsgrößen und den Parametern berechnet werden (vgl. Anhang A.3). Da die „Camera Calibration Toolbox“ keine separaten Unsicherheitsverteilungen für die Pass- und Bildpunkte unterstützt, bietet es sich an eine Monte-Carlo-Variante (MCM) umzusetzen. Dabei werden aus einer Vielzahl zufälliger Stichproben aus den Unsicherheitsintervallen der Eingangsgrößen die Veränderungen der berechneten Ausgangsgrößen bestimmt. Diese ermöglichen eine numerische Schätzung der Ausgangsverteilungen. Daraus ergibt sich für die Referenzrahmenkalibration der in Abbildung 4.35 dargestellte schematische Prozess.

Die zeitliche Stabilität der Kameraparameter wurde in diesem Zusammenhang noch nicht berücksichtigt. Aufgrund des Zeitunterschiedes zwischen Kalibrations- und Bewegungserfassungsphase ist diese jedoch für die eigentliche

²⁶Metas.UncLib – An advanced Measurement Uncertainty Calculator, <http://www.metas.ch/metasweb/Fachbereiche/Elektrizitaet/HF/MetasUncLib> [12.09.2012]

4.4. Messunsicherheitsbestimmung

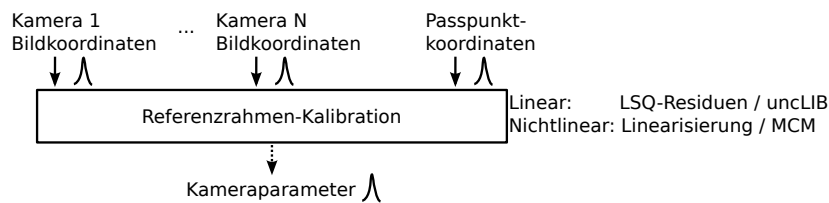


Abb. 4.35: Der Prozess der Referenzrahmenkalibration

Messung unsicherheitsrelevant. Eine funktionale Modellierung der zeitlichen Veränderungen ist allerdings aufgrund der vielen (unbekannten) Einflussfaktoren nicht zielführend. Daher sollte die Stabilität der Parameter z. B. mit einem Erweiterungsfaktor für die in der Kalibrationsphase ermittelten Unsicherheitsverteilungen berücksichtigt werden. Dieser Faktor kann beispielsweise aufgrund durchgeführter Hardwaretests bestimmt werden. Im vorliegenden Fall spielt dafür unter anderem die Repositioniergenauigkeit eine Rolle (vgl. Abschnitt 4.1.3). Generell ist darüber hinaus zu empfehlen, den zeitlichen Abstand zwischen Kalibrations- und Bewegungserfassungsphase so kurz wie möglich zu halten. Bei einem längeren Zeitintervall zwischen Kalibrations- und Bewegungserfassungsphase bietet sich eine kurze Kontrollmessung vor der eigentlichen Bewegungserfassung an. Diese ist z. B. mit den im vorigen Abschnitt beschriebenen Markercluster-messungen möglich.

Bei der dynamischen Kalibration nach Svoboda (Abschnitt 4.3) verändert sich die Genauigkeit der eingehenden Bildpunkte aufgrund zusätzlich entstehender Unsicherheitsfaktoren bei der Erfassung bewegter Objekte. Dazu zählen neben der Videosynchronisierung und den Rolling-Shutter-Abweichungen beispielsweise auch die Decodierungenauigkeiten bei der Videoauswertung. Sind die Verteilungsgrößen dieser Parameter bekannt, kann jedoch in einem der Kalibrationsphase vorgelagerten Schritt eine erweiterte räumliche Unsicherheit der Bildpunkte bestimmt werden. Für die beschriebene Systemkonfiguration wurden die Verteilungen der Rolling-Shutter-Verzögerungszeit und der Bildrate durch die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Hardwaretests ermittelt. Die Verteilungsgrößen der Bildpunkte werden direkt bei der Extraktion der Koordinaten aus den Videos bestimmt (vgl. Abschnitt 4.2). Dabei kann im manuellen Fall bei vorliegender Dual-Rater-Auswertung eine Rechteckverteilung angenommen werden. Alternativ kann auch hier eine Erweiterung der Unsicherheitsintervalle auf Basis der beiden Messwerte pro Bildpunkt erfolgen. Dazu kann der Mittelwert und die Abweichungen der Punkte zu diesem (als Standardabweichung) bestimmt und daraus z. B. eine Normalverteilung mit einem zu definierenden Erweiterungsfaktor abgeleitet werden. Für die automatischen Extraktionsmethoden kann diese aus der bei der Subpixelinterpolation auf die Helligkeitsverteilung angepassten, bivaria-

ten Verteilung gewonnen werden. Alternativ kann auch die aus der normierten Qualitätsmetrik bestimmte Verteilung verwendet werden, was sich vor allem bei den verwendeten, retroreflektierenden Markern anbietet (vgl. Abschnitt 4.2).

Die anschließende zweidimensionale Trajektorienbestimmung führt zu keiner Veränderung der zugeordneten räumlichen Verteilungsgrößen. Sind die zweidimensionalen Trajektorien bekannt, können jedoch die zusätzlich durch die Rolling-Shutter-Verzögerung entstehenden Unsicherheiten bestimmt werden. Das mathematische Modell entspricht hier der Gleichung 4.7, so dass unter Anwendung der analytischen GUM-Methode aus den bekannten Verteilungsgrößen für die Bildpunktextraktion und für die Rolling-Shutter-Verzögerung die Unsicherheit der korrigierten Bildpunktkoordinaten berechnet werden kann. Bildet man die partiellen Ableitungen der Gleichung 4.7 (vgl. Anhang A.4), kann aufgrund der unkorrelierten Eingangsgrößen mit der Gleichung 2.10 die Ausgangsverteilung ermittelt werden. Dies wurde für die in Abschnitt 4.1 ermittelte Rolling-Shutter-Verzögerung durchgeführt. Exemplarische Ergebnisse dieser Berechnung sind abhängig von der vertikalen Bildposition y und einer horizontalen Objektgeschwindigkeit v zwischen 0px und 40px pro Bild in Abbildung 4.36 dargestellt. Dabei wird eine Digitalisierungsgenauigkeit von 0.25px (linke Grafiken) und 1px (rechte Grafiken) unter Annahme von Normalverteilungen für die Unsicherheiten der Eingangsgrößen zugrunde gelegt. Mit diesen soll der Genauigkeitsunterschied von manuellen zu automatischen, subpixelgenauen Auswertemethoden ausgedrückt werden. In der Abbildung wird deutlich, dass auch bereits bei verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten mit Zunahme der vertikalen Bildposition eine große Korrektur erforderlich wird. Betrachtet man die Unsicherheitsverteilungen in der unteren Reihe, so zeigt sich bereits bei ruhendem Objekt eine Verdoppelung der horizontalen Positionsunsicherheit über das gesamte Bild. Diese hohe Variabilität der Unsicherheiten ist auch für die Rekonstruktion von Objekten mit mehr als zwei Kameras relevant, da eine Gewichtung der Einzelmessungen auf Basis dieser Daten das Gesamtergebnis verbessern könnte. Idealerweise kann dies beim Einsatz von Ausgleichsverfahren durch den Eingangsgrößen beigeordnete Unsicherheiten gelöst werden. Alternativ können auch gewichtete Least-Squares-Ansätze verfolgt werden (vgl. auch Abschnitt 3.3.3).

Die Asynchronität der Erfassung zwischen den einzelnen Kameras kann durch die in Abschnitt 4.2.6 beschriebene Methode der LED-Synchronisierung und Neuabtastung der Bildpunkte aufgrund der dadurch ermittelten Bildratenunterschiede erfolgen. Daran anschließend kann der temporalen Unsicherheit bei Einschränkung auf nicht sprunghafte Veränderungen eine Rechteckverteilung von ± 1 Frame zugeordnet werden. In diesem Schritt könnten eventuell auch durch die Videodecodierung auftretende Fehler berücksichtigt werden. Im vorliegenden Fall wird jedoch davon ausgegangen, dass durch die einmalige und

4.4. Messunsicherheitsbestimmung

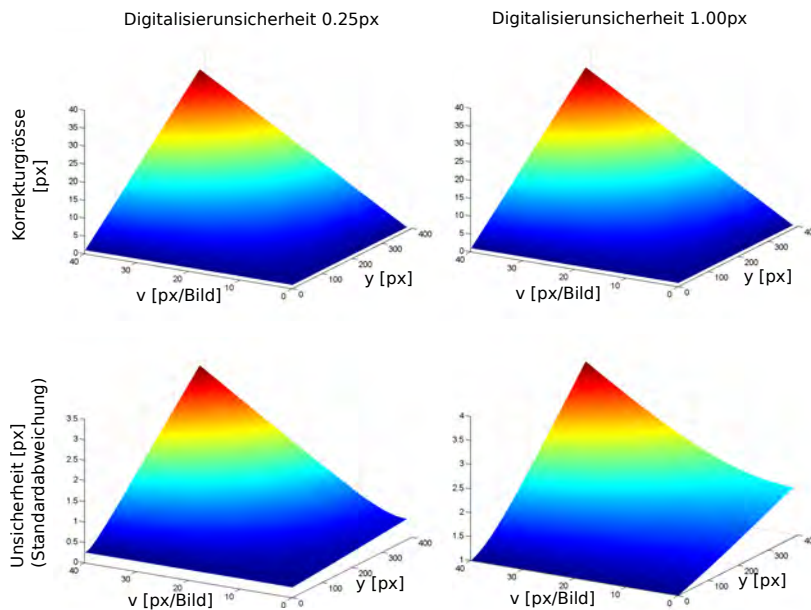


Abb. 4.36: Geschätzte korrigierte Horizontalpositionen aus der Unsicherheitsberechnung nach GUM für die Rolling-Shutter-Korrektur bei Variation von Objektgeschwindigkeit und vertikaler Bildposition (obere Reihe). Abhängig von der Unsicherheit der Eingangsgrößen variiert die Unsicherheit der Ausgangsgrößen. In der unteren Reihe links wird eine Digitalisiergenauigkeit von 0.25px zugrunde gelegt, rechts eine für manuelle Auswertungen geschätzte Genauigkeit von 1.00px.

zeitgleiche Decodierung und Verarbeitung der Videos keine weiteren temporalen Fehler entstehen (vgl. Abschnitt 4.2.1).

An die Stelle der Passpunkte des Referenzrahmens treten die Passpunkte des Skalierungsmaßstabs (Abb. 4.30), deren Verteilungsgrößen nur durch (unabhängige) Referenzmessungen bestimmt werden können. Im vorliegenden Fall wurden diese durch eine manuelle Referenzmessung und für die spätere Validierungsmessung durch eine Referenzmessung mit dem VICON-System der Universität Bern gewonnen.

Das zugrundeliegende Messmodell der dynamischen Kalibrierung basiert auf den Kollinearitätsgleichungen (in homogener Form) und zusätzlichen Gleichungen zur Verzeichnungskorrektur. Der Bündelblockausgleich der „Camera Calibration Toolbox“ (Bouguet, 1999) nutzt ein nichtlineares Optimierverfahren, in dem die Unsicherheiten der Kameraparameter ermittelt werden. Diese entsprechen der dreifachen Standardabweichung des bei der Schätzung der Parameter auftretenden Fehlers. Wie schon oben erwähnt, können innerhalb des Softwaremoduls keine separaten Verteilungsgrößen für die Eingangsgrößen des Bündelblockausgleichs angegeben werden. Daher kann für die Bestimmung der Ausgangsverteilungen ohne Softwareanpassung in diesem Fall nur eine Monte-Carlo-Methode

genutzt werden. Durch mehrfaches Berechnen der Kalibration mit zufällig aus den Verteilungsmassen der Eingangsgrößen gewählten Realisierungen der Verteilungsgrößen können damit die Ausgangsverteilungen bestimmt werden.

Dieses Vorgehen ist jedoch aufgrund der Berechnungsdauer der dynamischen Kalibration in vorliegender Implementierung nicht sinnvoll einsetzbar²⁷. Daher wird auch hier eine mehrstufige Vorgehensweise gewählt, in der aus den zweidimensionalen Trajektorien nur die Punkte ausgewählt werden, die eine Unsicherheit kleiner als einem einstellbaren Schwellwert aufweisen. Das sind die Punkte, die entweder im oberen Bereich des entsprechenden Bildes aufgezeichnet wurden oder deren aktuelle Horizontalgeschwindigkeit verhältnismäßig klein ist. Durch diese Auswahl kann ein Maximalwert der Unsicherheit der Eingangsgrößen sichergestellt werden und dadurch die Abweichungen der Kalibration minimiert werden. Für die Ausgangsverteilungen können dann die bereits oben genannten innerhalb des Bündelblockausgleichs ermittelten Unsicherheiten der Kameraparameter angenommen werden. Daraus lässt sich für die Durchführung der Kalibration ableiten, dass die Kalibrationsbewegung möglichst langsam erfolgen sollte und idealerweise an unterschiedlichen Positionen im Raum gestoppt wird. Der aus dieser Vorgehensweise entstehende Messprozess ist in Abb. 4.37 dargestellt.

Für die Bewegungserfassungsphase dienen die ermittelten Kameraparameter und Unsicherheitsgrößen mit Erweiterung aufgrund der zeitlichen Instabilität der Kameraparameter als Eingangsgrößen. Als weitere Eingangsgrößen kommen die Bildkoordinaten aus den Trajektorien der einzelnen Kameras hinzu. Identisch zu dem bei der dynamischen Kalibration beschriebenen Verfahren, können deren Verteilungsgrößen ebenfalls in einem der Rekonstruktion vorgelagerten Schritt bestimmt werden.

Das mathematische Messmodell, mit dem die Messgrößen zu den Eingangsgrößen zugeordnet werden, wird für jeden Bildpunkt und jede Kamera durch die Gleichung des räumlichen Vorwärtsschnitts beschrieben. Falls Objektivverzeichnungen korrigiert wurden, sind zusätzlich die Gleichungen der Verzeichnungskorrektur Bestandteil des Messmodells. Auch hier wird die Überbestimmung des Gleichungssystems (Gleichung 3.52) durch Least-Squares-Methoden gelöst. Dazu wird die bereits bei der DLT-Kalibration beschriebene Vorgehensweise zur Erweiterung der unCLIB (s.o.) angewendet. Damit kann die Unsicherheit der Messgröße auf Basis aller Eingangsgrößen bestimmt werden (Abb. 4.38).

Nachdem die Rekonstruktionen aus allen Kamerapaaren gebildet wurden, können diese mit einem Modellblockausgleich unter Berücksichtigung der einzelnen Unsicherheiten optimiert werden (vgl. Abschnitt 3.3.3). Die so gewonnenen

²⁷Ein Kalibrationsdurchlauf dauert abhängig von der Anzahl der verwendeten Punkte und der zu erzielenden Genauigkeit zwischen ca. 15min und 2 Stunden.

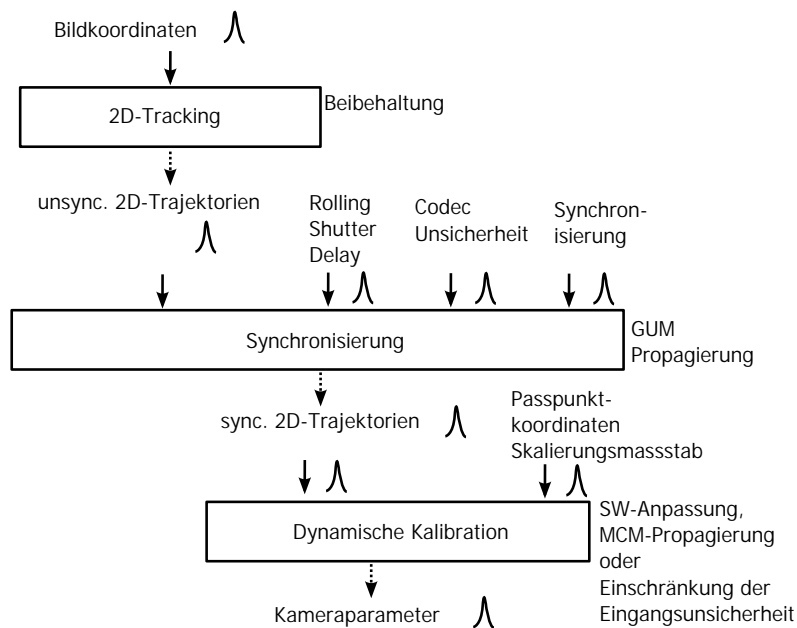


Abb. 4.37: Der aus der beschriebenen Vorgehensweise entstehende schematische Prozess der dynamischen Kalibration

Rekonstruktionen sind allerdings typischerweise im Hinblick auf die Rekonstruktionsabweichung nicht statistisch optimal. Alternativ führt ein Bündelblockausgleich über alle Punktschätzungen bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Unsicherheiten der Eingangsgrößen zu einem statistisch optimalen Ergebnis und ermöglicht bei der Berücksichtigung des stochastischen Modells des Ausgleichs auch gleichzeitig die Propagierung der Unsicherheiten zu einer Unsicherheitsverteilung der Ausgangsgrößen (vgl. Abschnitte 3.3.4 und 3.3.7 sowie Abb. 4.39). Die aktuelle Implementierung des Bündelblockausgleichs geht jedoch von identischen Unsicherheiten aller Eingangsgrößen aus. Damit ist nicht zu erwarten, dass die erhaltenen Ergebnisse im statistischen Sinn optimal sind. Die Unsicherheit des Gesamtergebnisses kann jedoch dennoch bei Ausschluss von Ausreißern verringert werden.

Der finale Schritt des Messprozesses besteht in der Trajektorienbestimmung auf Basis der rekonstruierten Punkte. Dabei werden zuerst automatisch Trajektorien erstellt, die abschließend manuell überprüft werden können und falls Lücken auftreten auch manuell verknüpft werden können. Die in diesem Prozess entstehenden Unsicherheiten sind nicht in der Messunsicherheitsbestimmung enthalten. Möglich wäre den unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der erfassten Punkte glattesten B-Spline durch die Lücken zu legen und diesem die bei der Extrapolation entstehenden Unsicherheiten zuzuordnen. Auf Basis der so ermittel-

4. SYSTEMENTWICKLUNG

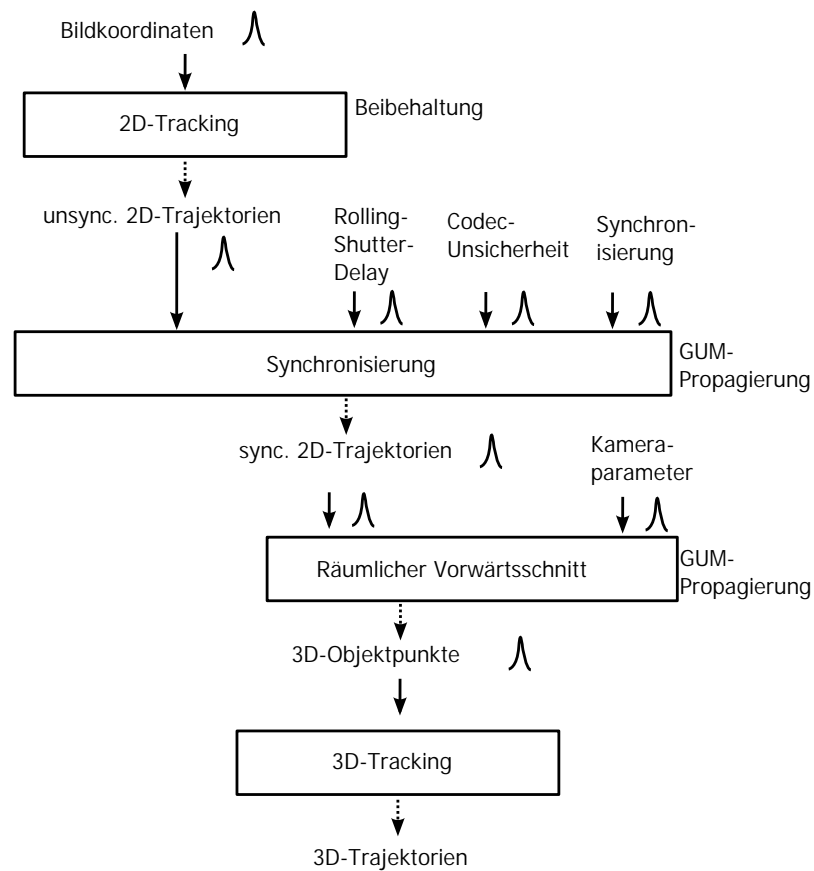


Abb. 4.38: Für die Rekonstruktion dreidimensionaler Koordinaten mit dem Vorwärtsschnitt ergibt sich der dargestellte Prozess.

ten Verteilungsgrößen können aufgrund der zugrunde gelegten Konfidenzwahrscheinlichkeiten die entsprechenden Konfidenzintervalle gebildet werden.

Die für die beschriebenen Systemkonfigurationen in den einzelnen Messphasen relevanten Eingangsgrößen, deren Verteilungen sowie die zur Propagierung genutzten Messmodelle und die Methoden zur Unsicherheitsfortpflanzung sind in den Tabellen 4.2, 4.3 und 4.4 zusammengefasst.

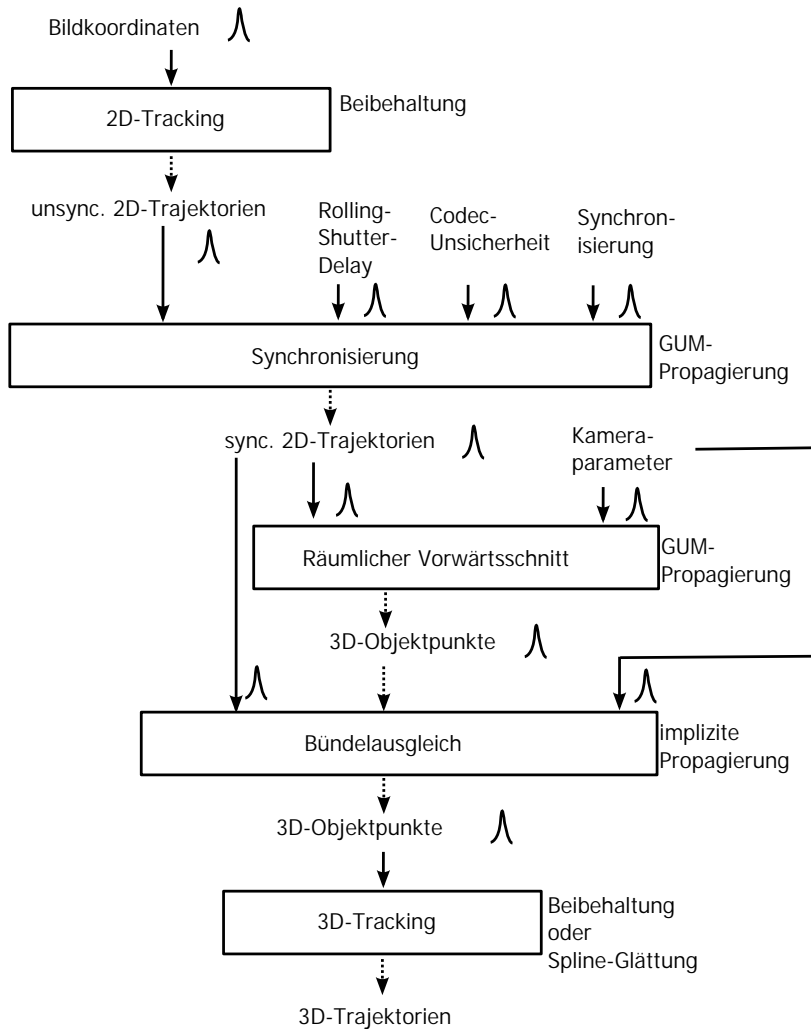


Abb. 4.39: Wird ein Bündelblockausgleich genutzt, werden im letzten Schritt der Rekonstruktion auf Basis der zuvor ermittelten Schätzwerte der dreidimensionalen Punktkoordinaten eine für alle Punkte statisch optimale Rekonstruktion ermittelt. Durch das stochastische Modell des Ausgleichsverfahrens können dabei direkt die Unsicherheiten der Ausgangsgrößen bestimmt werden.

Tab. 4.2: Je nach Systemvariante und Prozessstufe unterscheiden sich die Eingangsgrößen, Verteilungen und Messmodelle. Hier werden die relevanten Größen für die DLT-Verfahren dargestellt.

Prozessstufe/ Variante	Eingangsgröße	Verteilung	Ausgangsgröße	Messmodell	Propagierung
lineare DLT	Bildkoordinaten, manuelle Erfassung	2D-Verteilung (Dual-Rater-Auswertung)	Kameraparameter	DLT-Gleichung	LSQ / unclIB
	Bildkoordinaten, automatische Erfassung	2D-Verteilung			
	Passpunktkoordinaten	3D-Verteilung (externe Referenzmessung)			
nichtlineare DLT	Bildkoordinaten, manuelle Erfassung	2D-Verteilung (Dual-Rater-Auswertung)	Kameraparameter und Verzeichnungsparameter	BA-Verfahren (Bouguet, 1999)	Linearisierung oder Monte-Carlo-Methode
	Bildkoordinaten, automatische Erfassung	2D-Verteilung			
	Passpunktkoordinaten	3D-Verteilung (externe Referenzmessung)			

Tab. 4.3: Je nach Systemvariante und Prozessstufe unterscheiden sich die Eingangsgrößen, Verteilungen und Messmodelle. Hier werden die relevanten Größen für die Synchronisierung der zweidimensionalen Trajektorien und für die dynamische Kalibration dargestellt.

Prozessstufe/ Variante	Eingangsgröße	Verteilung	Ausgangsgröße	Messmodell	Propagierung
Synchronisierung der Bildkoordinaten	Trajektorien	2D-Verteilung pro Ko- ordinate	synchronisierte Trajektorien	Gleichung 4.7 und Neuabtastung der Trajektorien (Skript)	analytisches Verfahren durch lineare Interpolation der Trajektorien
	Rolling-Shutter- Verzögerung	1D-Verteilung (Hard- waretests)			
	Synchronisierungs- fehler	Rechteckverteilung (+/- 1 Frame)			
	Codec-Fehler	Rechteckverteilung (+/- 0 Frames)			
dynamische Kalibration (Svoboda, Martinec & Pajdla, 2005)	synchronisierte Tra- jektorien Passpunkt- koordinaten	2D-Verteilung 3D-Verteilung (ex- terne Referenzmes- sung)	Kameraparameter und Verzeichnungs- parameter	BA-Verfahren (Bouguet, 1999)	Monte-Carlo- Methode oder mehrstufig und interne Bestimmung

Tab. 4.4: Je nach Systemvariante und Prozessstufe unterscheiden sich die Eingangsgrößen, Verteilungen und Messmodelle. Hier werden die relevanten Größen für die Rekonstruktion mit linearen Verfahren und dem Bündelausgleich dargestellt.

Prozessstufe/ Variante	Eingangsgröße	Verteilung	Ausgangsgröße	Messmodell	Propagierung
Rekonstruktion, lineare DLT	synchronisierte Trajektorien Kamera-parameter	ermittelte 2D-Verteilung ermittelte 2D-Verteilung	dreidimensionale Objektpunkte	Räumlicher Vorwärtsschnitt	LSQ / unclIB
Rekonstruktion, Vorwärtsschnitt	synchronisierte Trajektorien Kamera-parameter	ermittelte 2D-Verteilung ermittelte 2D-Verteilung	dreidimensionale Objektpunkte	Räumlicher Vorwärtsschnitt	lineare Taylorreihenapproximation
Rekonstruktion, Bündelausgleich	synchronisierte Trajektorien Kamera-parameter	ermittelte 2D-Verteilung ermittelte 2D-Verteilung	dreidimensionale Objektpunkte	Bündelausgleich	stochastisches Modell des Bündelausgleichs

Ergebnisse

Bereits parallel zur Entwicklung der Softwareroutinen für die Bewegungserfassung fanden verschiedene Komponententests statt. Die Ergebnisse dieser Tests wurden bei direkter Relevanz für die Methodenwahl bereits in Abschnitt 4 dargestellt. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der darüber hinaus durchgeführten Simulationsstudien und die Ergebnisse der Tests des Gesamtsystems berichtet.

5.1 Ergebnisse der Simulationen

Die Simulationsumgebung wurde implementiert, um unabhängig von speziellen Eigenschaften der Consumer-Kameras die Kalibrationsalgorithmen verifizieren und ihr Verhalten bei unterschiedlichen Fehlereinflüssen quantifizieren zu können. Dabei wurde ein System mit identischen geometrischen Abmessungen simuliert, wie es im Anschluss bei den realen Messungen zum Einsatz kommen wird (vgl. Abschnitt 4.3). Dadurch können die erhaltenen Werte und Abweichungen direkt miteinander verglichen werden und die entstehenden Unterschiede auf den Einfluss der Consumer-Hardware zurückgeführt werden.

In einer ersten Simulation wurden die Einflüsse zufälliger Abweichungen auf die Rekonstruktionsgenauigkeit des DLT-Algorithmus in Abhängigkeit von der Verwendung eines Bündelblockausgleichs untersucht (vgl. Abschnitt 4.3). Dabei wurden die Abweichungen der Passpunkte und die Genauigkeit der Digitalisierung der Passpunkte im Video in den in Tabelle 5.1 dargestellten Stufen variiert. Für die Kalibration wurden jeweils 26 der insgesamt 52 Passpunkte des simulierten Referenzrahmens genutzt. Dadurch konnte der Unterschied der Rekonstruktionsabweichungen zwischen den zur Kalibration und den nicht zur Kalibration genutzten Passpunkten bestimmt werden.

Deskriptiv sind die erhaltenen Daten in der Abbildung 5.1 für die Rekonstruktionsabweichungen von zur Kalibration benutzten Passpunkten (K-Passpunkte) und in der Abbildung 5.2 für die Rekonstruktionsabweichungen von separaten Passpunkten (NK-Passpunkte) dargestellt. Die Boxplots sind nach den Stufen

5. ERGEBNISSE

Tab. 5.1: Stufen der simulierten zufälligen Abweichungen von Passpunkten und der Digitalisierungsabweichungen für die K- und NK-Passpunkte und die Stabendpunkte für die Simulation der Rekonstruktionsabweichungen

Abweichung [Einheit]	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5
Passpunkte [mm]	0	10	20	40	60
Digitalisierung K-Passpunkte [px]	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Digitalisierung NK-Passpunkte [px]	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Digitalisierung Stabendpunkte [px]	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00

der Abweichungen gemäß Tabelle 5.1 gruppiert und bilden die jeweiligen Rekonstruktionsabweichungen in Millimetern ab. Diese wurden jeweils aus der maximal auftretenden Abweichung bei der Rekonstruktion aller Passpunkte mit allen Kamera paaren berechnet. Dies ist typischerweise der kritischste Fall, da die Rekonstruktion mit mehreren Kameras im Allgemeinen zu einer genaueren Least-Squares-Lösung führt¹. Dies wird auch in Abbildung 5.3 deutlich, in der die durchwegs kleineren Abweichungen bei der Rekonstruktion mit allen vier Kameras dargestellt sind.

Vergleicht man die Beträge der Rekonstruktionsabweichungen, so wird eine Unterschätzung der tatsächlich auftretenden Abweichungen bei den K-Passpunkten deutlich. Diese ist nicht nur über alle Simulationsstufen hinweg höchst signifikant, $t(249)=-8.7636$, $p<.001$, sondern auch für die Nutzung dieser Größe zur Abschätzung der wirklich vorhandenen zufälligen Fehler relevant. Für die Anwendung der linearen DLT kann man mit Einschränkung auf zeichnungs-freie Kameras und unter Ausschluss systematischer Abweichungen daher schließen, dass die mit den einzelnen Kamera paaren aus NK-Passpunkten ermittelte Rekonstruktionsabweichung ein guter Schätzer für die tatsächlich entstehende statische Abweichung ist. Dies gilt unabhängig von der Variation der Digitalisierungsabweichungen, welche in den Multi-Vari-Charts der Abbildung 5.4 auf der linken Hälfte dargestellt sind. Deutlich wird hier, dass nur bei geringen Passpunktgenauigkeiten die Digitalisierungsabweichungen (unter einem Pixel) eine Rolle spielt. Blendet man die (nicht reliable) Größe der K-Passpunkte aus, so ist bereits ab einer zufälligen Abweichung von maximal 20 mm in den Passpunkt koordinaten kein oder nur noch ein leicht ansteigender Trend der entstehenden Abweichungen zu erkennen.

¹Eine Ausnahme bilden Kameras, die entweder durch systematische Fehler oder durch eine schlechte Kalibrierung wesentlich stärker fehlerbehaftet sind und deren Einfluss nicht mit gewichteten Ausgleichsverfahren korrigiert wurde.

5.1. Ergebnisse der Simulationen

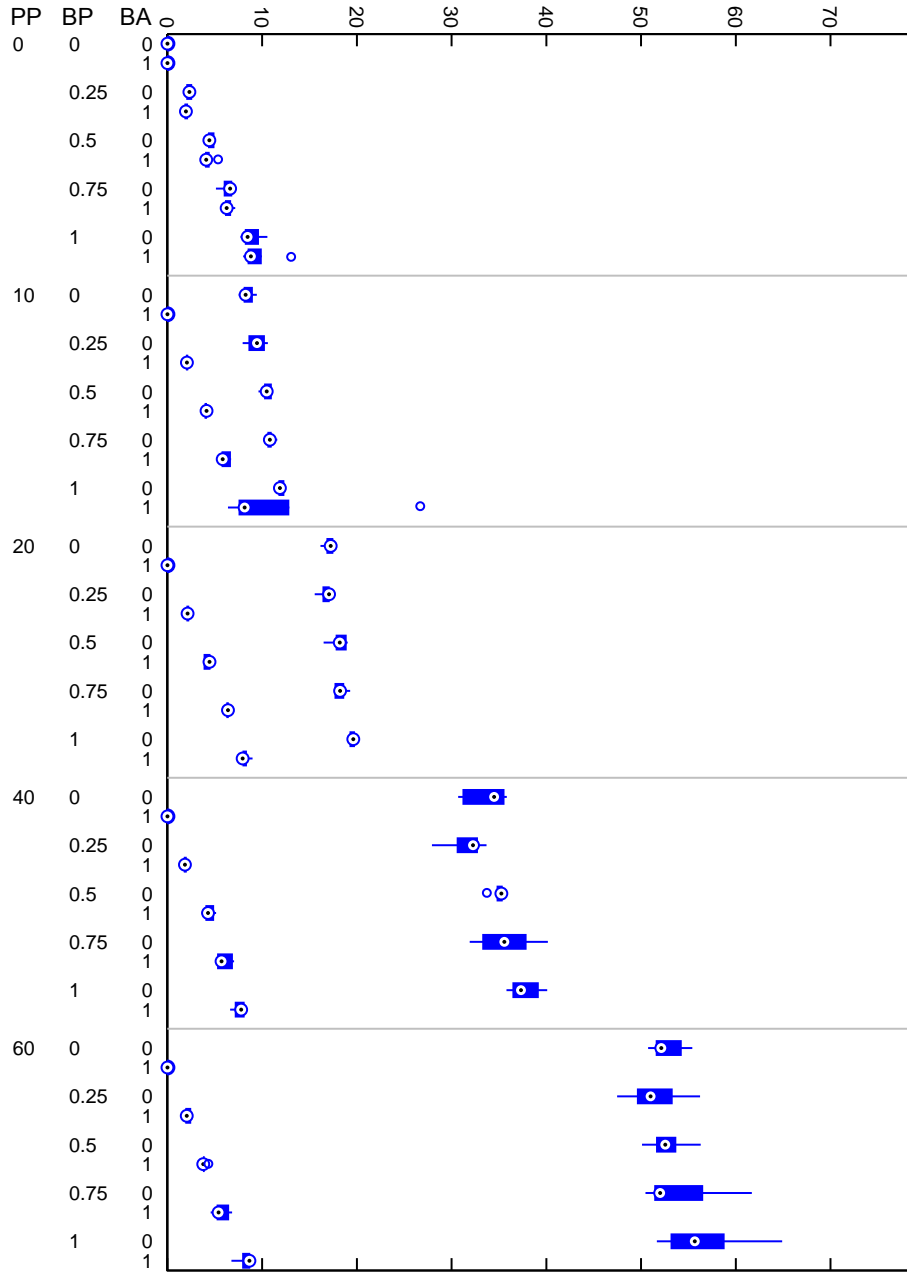


Abb. 5.1: Auswirkungen zufälliger (normalverteilter) Abweichungen der Passpunktkoordinaten (PP), der Bildkoordinaten (BP) und des Einsatzes des Bündelblockausgleichs (BA) auf die Rekonstruktionsgenauigkeit zur Kalibration verwendeter Passpunkte [mm]

5. ERGEBNISSE

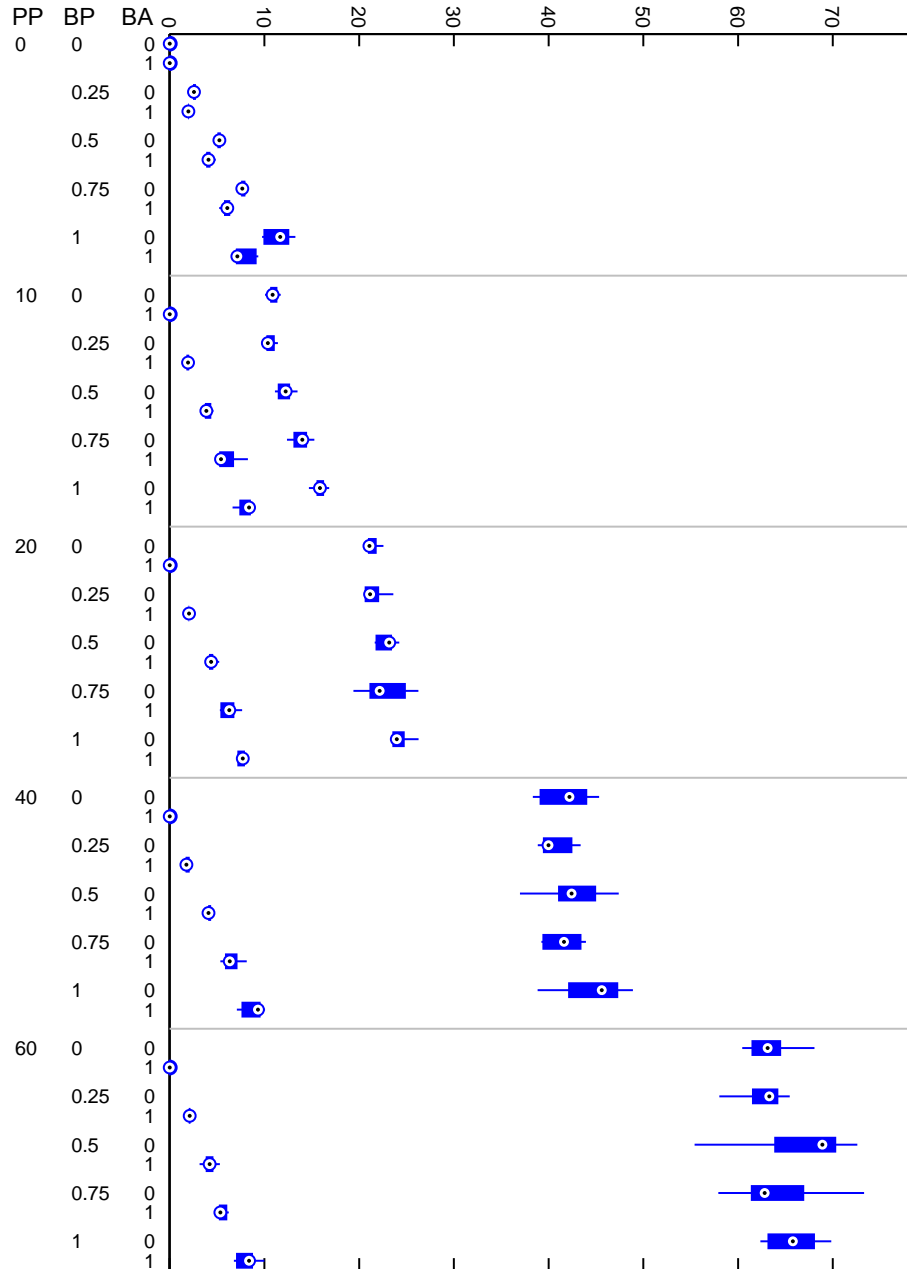


Abb. 5.2: Auswirkungen zufälliger (normalverteilter) Abweichungen der Passpunktkoordinaten (PP), der Bildkoordinaten (BP) und des Einsatzes des Bündelblockausgleichs (BA) auf die Rekonstruktionsgenauigkeit nicht zur Kalibration verwendeter Passpunkte [mm]

5.1. Ergebnisse der Simulationen

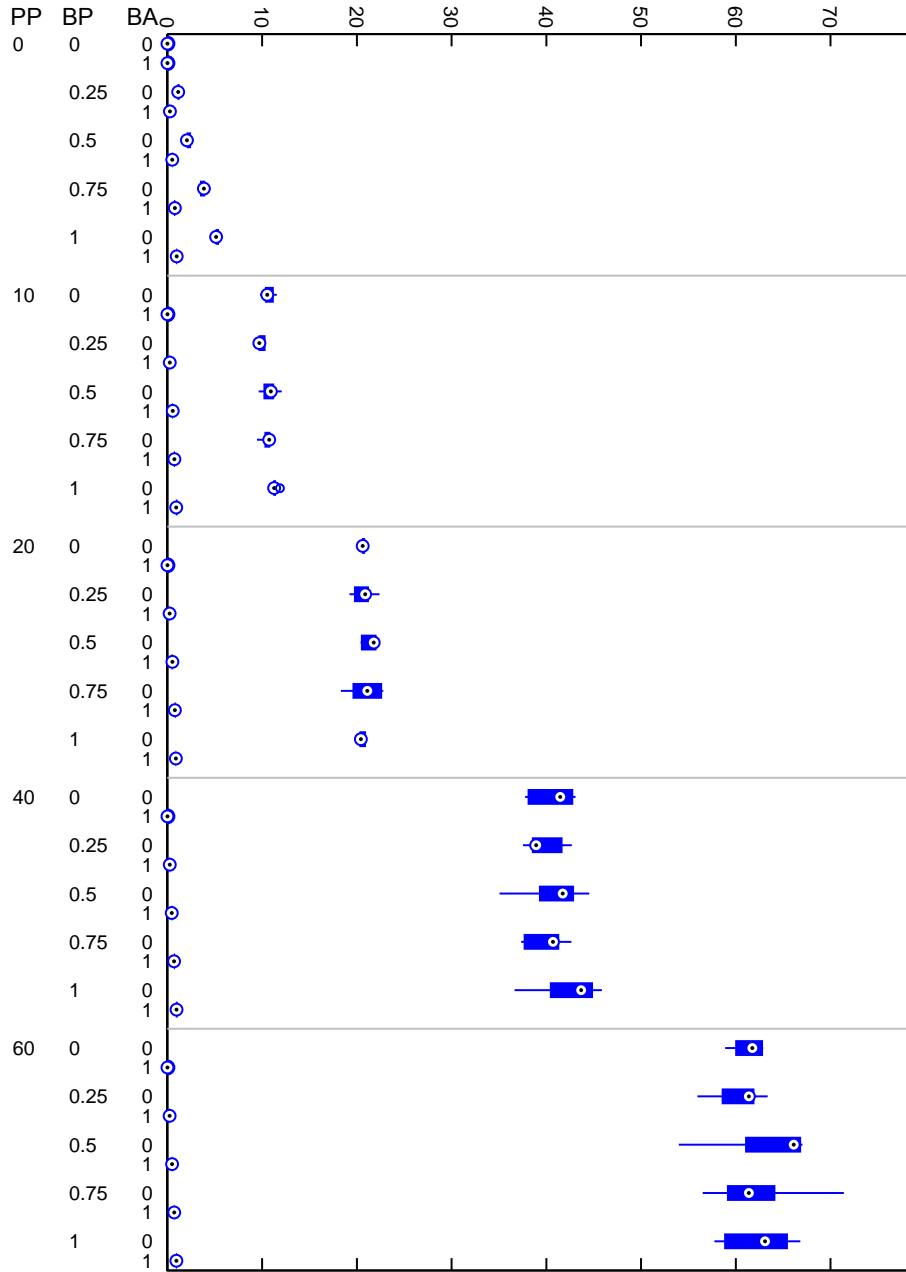


Abb. 5.3: Auswirkungen zufälliger (normalverteilter) Abweichungen der Passpunktkoordinaten (PP), der Bildkoordinaten (BP) und des Einsatzes des Bündelblockausgleichs (BA) auf die Rekonstruktionsgenauigkeit nicht zur Kalibration verwendeter Passpunkte bei vier Kameras [mm]

5. ERGEBNISSE

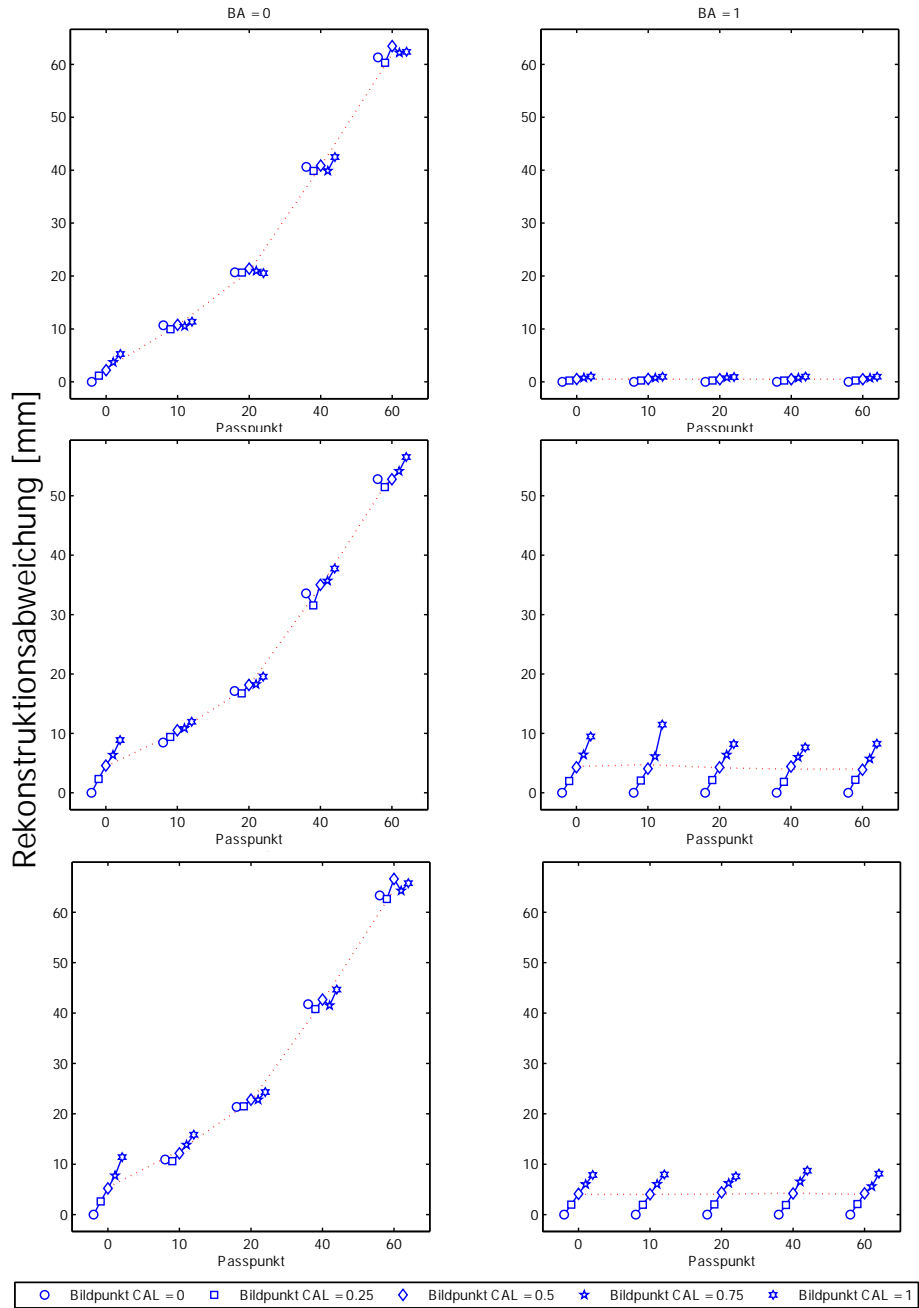


Abb. 5.4: Die Multi-Vari-Charts zeigen (unter anderem) die Auswirkungen unterschiedlicher Digitalisierungsabweichungen auf die Rekonstruktionsgenauigkeit der Passpunktkoordinaten [mm]. Von oben nach unten sind die Rekonstruktionen von NK-Passpunkten mit allen Kameras, die Rekonstruktion von K-Passpunkten und von NK-Passpunkten mit Kamera-paaren dargestellt.

Besonders deutlich wird allerdings der Einfluss des Bündelblockausgleichs (BA, vgl. Abschnitt 3.3.3), der aufgrund seiner statistisch optimalen Schätzeigenschaften – wie erwartet – die zufälligen Passpunktabweichungen komplett kompensiert (Abb. 5.4, rechte Seite). Die Digitalisierabweichungen der Passpunktkoordinaten können allerdings nicht ausgeglichen werden, was besonders bei den Rekonstruktionsabweichungen der einzelnen Kamera-paare deutlich wird. Daraus kann abgeleitet werden, dass der Bündelblockausgleich vor allem zur Kompensation zufälliger Passpunktabweichungen geeignet ist, die er bei nicht vorhandenen systematischen Abweichungen vollständig ausgleichen kann. Sobald das Ausgleichsverfahren angewendet wird, spielen daher die Digitalisierabweichungen der Passpunkte eine grosse Rolle für die erreichbare Genauigkeit. Der kritischste Fall ist auch hier die Rekonstruktion mit einem Kamera-paar; kommen weitere Kameras hinzu kompensieren sich die zufälligen Digitalisierabweichungen gegenseitig und es kommt zu einer geringeren Abweichung bei der dreidimensionalen Rekonstruktion.

Die geschilderten Effekte spiegeln sich auch in der statistischen Auswertung wider. Eine multivariate Varianzanalyse (Tabelle 5.2), zeigt (höchst-)signifikante Haupteffekte für Passpunktkoordinaten, Digitalisierabweichungen (Bildpunkt CAL) und Bündelblockausgleich (BA), jedoch keine Signifikanz für die Genauigkeit der Bildkoordinaten zur Rekonstruktion. Betrachtet man die relativen Aufklärungsanteile so folgen nach dem Bündelblockausgleich, die Interaktion zwischen Passpunktabweichungen und Bündelblockausgleich und dann die Passpunktkoordinaten selbst. Erst dann folgen die Abweichungen durch das Digitalisieren der Passpunkte mit weniger als 1.5% Gesamtaufklärung, wenn man von einer mindestens pixelgenauen Bestimmung des Passpunktes ausgeht².

Zur finalen Verifikation der Rekonstruktionsabweichung von NK-Passpunkten als guten Schätzer für die wirklich auftretenden, statischen Rekonstruktionsabweichungen ist jedoch noch eine weitere Simulation mit einem Referenzobjekt sinnvoll, das an zufälligen Positionen innerhalb des kalibrierten Volumens positioniert werden kann und durch die Kameras rekonstruiert wird. Auch hier erfolgt eine Betrachtung der Abweichung von der wirklichen Länge, die im vorliegenden Fall mit 300 mm simuliert wurde (vgl. Abb. 5.5). Im Gegensatz zur Kalibration haben die Digitalisierabweichungen der Stabendpunkte den größten Einfluss auf die Längenabweichung des rekonstruierten Stabes (Tabelle 5.3). Auch bei manueller Referenzrahmenkalibration können daher subpixelgenaue, automatische Methoden zur Markerextraktion die entstehenden Abweichungen im Dreidimensionalen verringern. Der bei der Kalibration durchgeführte Bündelblockausgleich hat ebenfalls Einfluss auf die entstehenden Ungenauigkeiten. Ein hier nicht durchge-

²Dies kann bei der vorliegenden Kamera mit der Videoauflösung des HS300-Modus und manuellen Auswertemethoden zugrunde gelegt werden.

5. ERGEBNISSE

Tab. 5.2: Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse zur Aufklärung des Einflusses einzelner Faktoren auf die Rekonstruktionsabweichungen. Die Faktoren sind die Passpunktabweichungen („Passpunkt“), Bildpunktabweichungen bei der Kalibration („Bildpunkt CAL“) und Bildpunktabweichungen bei der Rekonstruktion („Bildpunkt REK“).

	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Passpunkt	28019.65	4	7004.91	1953.18	0.0000
Bildpunkt CAL	1227.39	4	306.85	85.56	0.0000
Bildpunkt REK	22.00	4	5.50	1.53	0.1944
BA	40202.00	1	40202.00	11209.54	0.0000
Passpunkt*Bildpunkt CAL	158.82	16	9.93	2.77	0.0005
Passpunkt*Bildpunkt REK	45.81	16	2.86	0.80	0.6862
Passpunkt*BA	28446.39	4	7111.60	1982.93	0.0000
Bildpunkt CAL*Bildpunkt REK	77.74	16	4.86	1.35	0.1694
Bildpunkt CAL*BA	148.14	4	37.03	10.33	0.0000
Bildpunkt REK*BA	15.07	4	3.77	1.05	0.3826
Error	631.21	176	3.59		
Total	98994.22	249			

Tab. 5.3: Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse für die Einflussfaktoren auf die rekonstruierte Stablänge

	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Passpunkt	1658.46	4	414.62	18.21	0.0000
Bildpunkt CAL	60.31	4	15.08	0.66	0.6189
Bildpunkt REK	23186.82	4	5796.71	254.66	0.0000
BA	140.14	1	140.14	6.16	0.0140
Passpunkt*Bildpunkt CAL	592.71	16	37.04	1.63	0.0659
Passpunkt*Bildpunkt REK	697.76	16	43.61	1.92	0.0216
Passpunkt*BA	174.66	4	43.67	1.92	0.1094
Bildpunkt CAL*Bildpunkt REK	389.75	16	24.36	1.07	0.3869
Bildpunkt CAL*BA	60.85	4	15.21	0.67	0.6148
Bildpunkt REK*BA	62.33	4	15.58	0.68	0.6035
Error	4006.20	176	22.76		
Total	31030.00	249			

fürher Bündelblockausgleich über Kameraparameter, Bildpunkte und zuvor rekonstruierte Weltpunkte würde jedoch noch eine wesentlich größere Reduktion der entstehenden Abweichungen mit sich bringen. Die Abweichungen selbst sind vom Betrag her geringer als die durch die Rekonstruktionsabweichungen der NK-Passpunkte geschätzten Größen, hängen allerdings von der Länge des Objektes ab: je länger, desto stärker wirken sich die zufälligen Abweichungen der Passpunkte aus (vgl. Abb. 5.6).

5.1. Ergebnisse der Simulationen

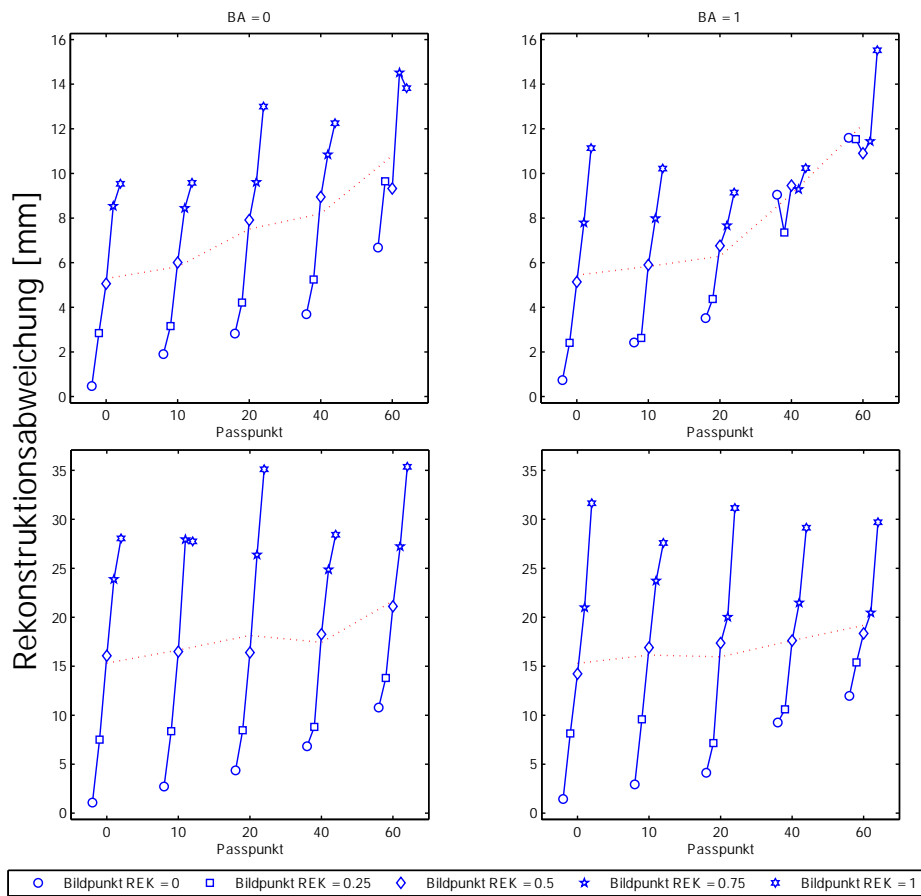


Abb. 5.5: Die Multi-Vari-Charts zeigen den größeren Einfluss zufälliger Digitalisierabweichungen der Stabendpunkte im Vergleich zu den anderen variierten zufälligen Abweichungen bei der Rekonstruktion der Stablänge [mm]. Auch hier ist die Rekonstruktion mit vier Kameras (oben) wesentlich genauer als mit Kamera paaren (unten).

In einer zweiten Simulation werden die Passpunktkoordinaten und Digitalisierabweichungen systematisch anhand der Größe des Maßstabs und durch einen konstanten Offset auf den Positionen variiert (Abb. 5.7). Bei Anwendung des Bündelblockausgleichs, der nur zufällig verteilte Fehler ideal kompensieren kann, wird hier erwartungsgemäß keine signifikante Verbesserung der Rekonstruktionsabweichung erzielt (Abb. 5.8 und Tabelle 5.4). Auf deskriptiver Ebene wird lediglich die Varianz der Gesamtabweichungen etwas kleiner, was mit den bei der dreidimensionalen Rekonstruktion hervorgerufenen zufälligen Effekten durch die im Bildraum systematischen Abweichungen erklärt werden kann.

5. ERGEBNISSE

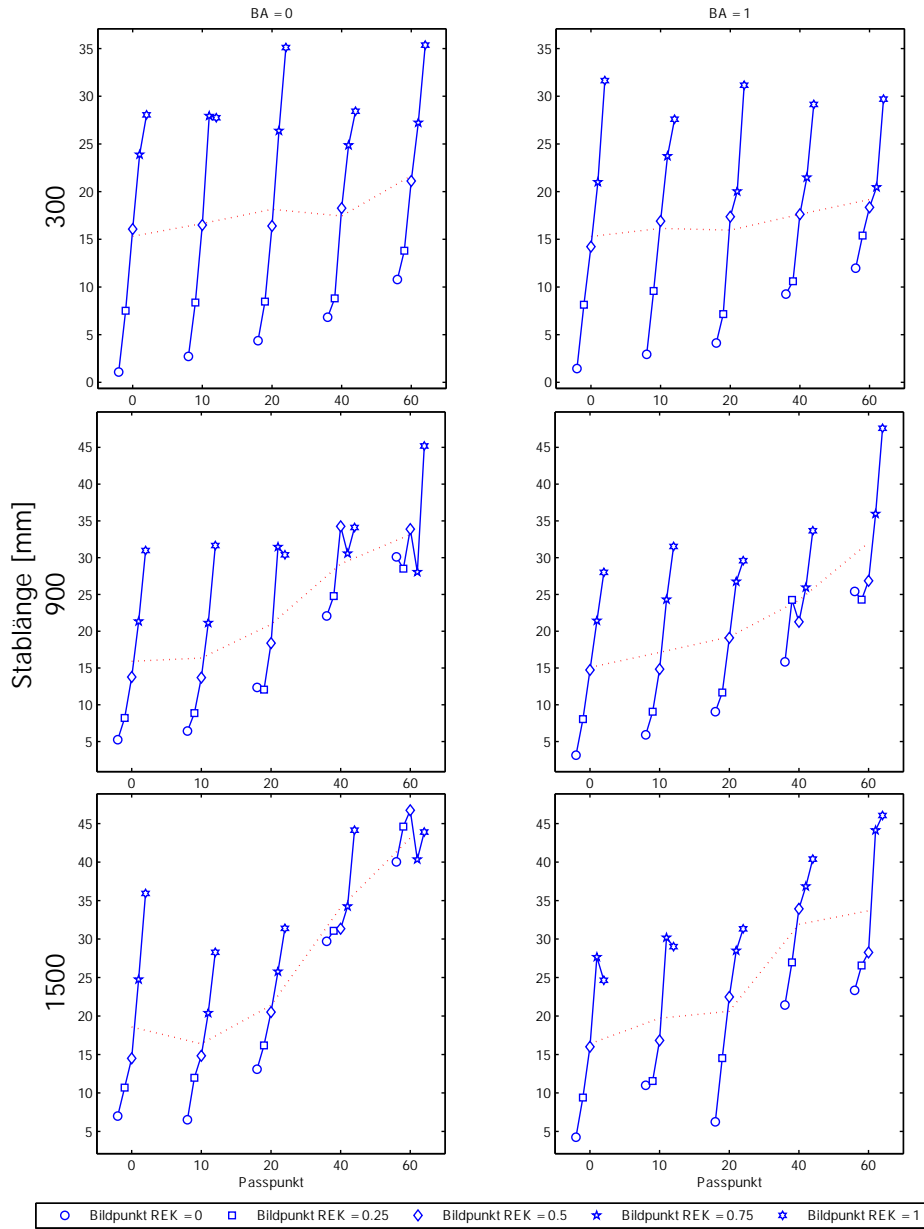


Abb. 5.6: Die Abweichungen [mm] hängen allerdings von der Länge des Objektes ab: je länger, desto stärker wirken sich die zufälligen Abweichungen der Passpunkte aus. Hier dargestellt am Vergleich eines 300, 900 und 1500 mm langen Stabes bei der Rekonstruktion mit Kamera paaren.

5.1. Ergebnisse der Simulationen

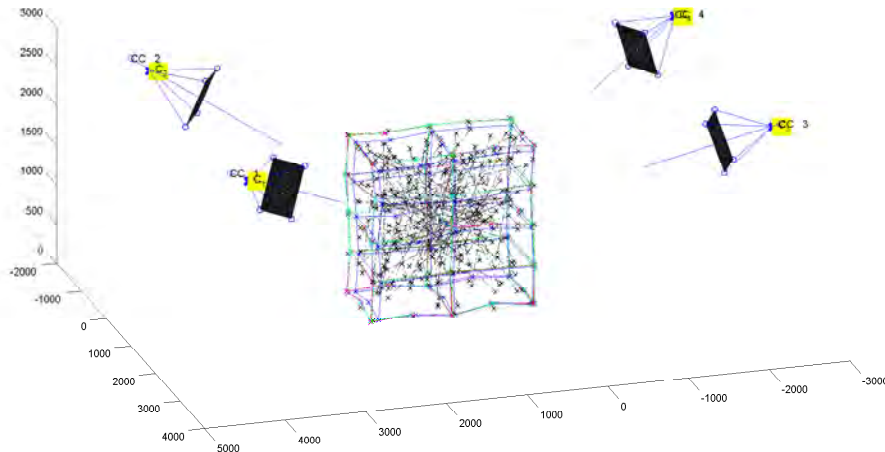


Abb. 5.7: Bei rein systematischen Fehlern, dargestellt durch die Maßstabsänderung des Referenzrahmens und die konstanten Offsets auf den Passpunktkoordinaten, kann der Bündelblockausgleich nicht zur Verbesserung der Rekonstruktionsgenauigkeit [mm] beitragen.

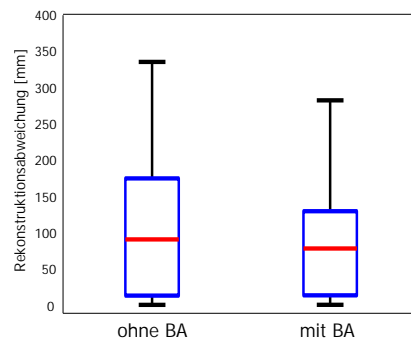


Abb. 5.8: Boxplot der Rekonstruktionsabweichungen bei rein systematischen Fehlern ohne (links) und mit Bündelblockausgleich (rechts)

Tab. 5.4: Die Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse zeigen keinen Einfluss des Bündelblockausgleichs bei rein systematischen Messfehlern.

	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
BA	3480.784	1	3480.784	0.774	0.383
Error	260715.250	58	4495.091		
Total	264196.034	59			

5.2 Ergebnisse der realen Datensätze

Bei den folgenden Messungen wurden die an der Universität Konstanz vorhandenen Kameras eingesetzt, um die Simulationsergebnisse des vorherigen Abschnitts mit den Ergebnissen eines realen Kamerasystems zu vergleichen. Zum einen kommen dabei aufgrund des nicht ideal zentralprojektiven Abbildungsverhaltens der Consumer-Kameras zusätzliche Fehlerquellen hinzu, zum anderen sind die erfassbaren Größen auf allen Prozessebenen mit systematischen und zufälligen Fehlern behaftet, die nicht mehr unabhängig analysierbar sind. Daher dienen diese Tests zur Größenabschätzung der Fehler im Vergleich zu den in der Simulation betrachteten Größen. Darüber hinaus sollen damit Referenzwerte für eine typische Anwendung des Konstanzer Systems bestimmt werden.

5.2.1 Referenzrahmenkalibration

Die Simulationsumgebung beschränkt sich auf ideal zentralprojektive, fehlerfreie Kameras. In einem ersten Schritt sollen daher die Effekte der Objektivverzeichnungen der verwendeten Kameras auf die Genauigkeit der Referenzrahmenkalibration untersucht werden. Dabei wird das Verhalten von linearen Methoden und Verfahren mit Verzeichnungskorrektur untersucht. Für die einzelnen Kamerapaare sind die Rekonstruktionsabweichungen für die verschiedenen Verfahren in Tabelle 5.5 für K-Passpunkte und in Tabelle 5.6 für NK-Passpunkte zusammengestellt. Mit dem linearen Verfahren und dem Konstanzer Referenzrahmen (vgl. Abb. 2.4) tritt eine maximale Rekonstruktionsabweichung von 17.27 mm für K-Passpunkte und von 18.95 mm für NK-Passpunkte auf, die durch eine Verzeichnungskorrektur auf 11.76 mm bzw. 17.46 mm verringert werden kann. Durch die zusätzlichen Verzeichnungsparameter erhält das Kameramodell weitere Freiheitsgrade, um sich an die Passpunkte anzugleichen. Dass in der Realität keine Verzeichnungskorrektur, sondern ein Ausgleich der Abweichungen der Passpunkt- und Digitalisierabweichungen erfolgt, macht die wesentlich größere Rekonstruktionsabweichung der NK-Passpunkte deutlich. Damit tritt hier das schon in Abschnitt 3.3.7 beschriebene Problem der Überanpassung auf die fehlerbehafteten Passpunktkoordinaten auf. Darüber hinaus belegen die Messungen die Annahme, dass bei der manuellen Referenzrahmenkalibration ohne Ausgleichsverfahren aufgrund der geringen Verzeichnungswerte der Kamera keine zusätzlichen Verzeichnungskorrekturen sinnvoll sind.

Nutzt man ein Bündelausgleichsverfahren nach der separaten Bestimmung aller Kameraparameter, so ergibt sich je nach Wahl der Vergleichswerte ein unterschiedliches Bild. Identisch zu oben kann man nur die eine Hälfte der Passpunkte zur Kalibration und zum Ausgleich nutzen und die rekonstruierten mit den

5.2. Ergebnisse der realen Datensätze

Tab. 5.5: Rekonstruktionsabweichungen von zur Kalibration verwendeten Passpunkten bei der Referenzrahmenkalibration

Methode	Rekonstruktionsfehler der Kalibrationspunkte [mm] der Kamera-paare				
	1&2	2&3	3&4	2&4	Max
DLT	13.08	17.27	13.88	12.70	17.27
MDLT	13.08	17.27	13.88	12.70	17.27
VZ & DLT	9.84	9.97	11.76	8.88	11.76
VZ & MDLT	9.84	9.97	11.76	8.88	11.76
BA	14.43	17.11	14.30	14.69	17.11
VZ & BA	11.02	10.97	11.20	10.07	11.20
VZ & BA (Bildpunkte fest)	9.84	9.97	11.76	8.88	11.76
VZ & BA (Passpunkte fest)	8.99	9.67	10.16	8.45	10.16

Tab. 5.6: Rekonstruktionsabweichungen von nicht zur Kalibration verwendeten Passpunkten bei der Referenzrahmenkalibration

Methode	Rekonstruktionsfehler der Kalibrationspunkte [mm] der Kamera-paare				
	1&2	2&3	3&4	2&4	Max
DLT	12.09	15.03	18.95	15.00	18.95
MDLT	12.09	15.03	18.95	15.00	18.95
VZ & DLT	9.80	12.42	17.46	12.73	17.46
VZ & MDLT	9.80	12.42	17.46	12.73	17.46
BA	14.92	16.95	18.59	16.03	18.59
VZ & BA	11.92	12.51	15.94	13.22	15.94
VZ & BA (Bildpunkte fest)	9.80	12.42	17.46	12.73	17.46
VZ & BA (Passpunkte fest)	10.44	11.88	14.99	11.98	14.99

angenommenen Passpunktkoordinaten vergleichen. Dabei zeigen sich keine verringerten Rekonstruktionsabweichungen, $t(6)=-.84$, $p=.43$.

Bei diesem Vergleich setzt man aber voraus, dass die Passpunktkoordinaten fehlerfrei sind, was bei dem verwendeten Referenzrahmen aufgrund der Bauweise und der manuellen Bestimmung der Passpunktkoordinaten nicht der Fall ist. Daher besteht eine zweite Vorgehensweise darin, alle rekonstruierten Passpunkte zur Rekonstruktion zu nutzen und anschließend einen Bündelblockausgleich durchzuführen. Berechnet man nun die verbleibenden Rekonstruktionsabweichungen, so sind diese ein Maß für die nicht ausgleichbaren, systematischen Abweichungen oder die nicht modellierten Systemeigenschaften. Diese Daten sind in Tabelle 5.7 zusammengefasst. Die maximale Rekonstruktionsabweichung beträgt beim Ausgleichsverfahren ohne Verzeichnungskorrektur 15.39 mm und beim Verfahren mit Verzeichnungskorrektur 12.11 mm. Dabei zeigt sich ein hochsignifikanter Effekt der Verzeichnungskorrektur, $t(6)=5.8676$, $p=.0011$. Auch dies kann durch eine Überanpassung an die Passpunkte hervorgerufen werden. Ef-

5. ERGEBNISSE

Tab. 5.7: Rekonstruktionsabweichungen einer Referenzrahmenkalibration bei Nutzung aller Passpunkte als ein Maß für die verbleibenden systematischen Abweichungen und nicht modellierten Systemeigenschaften (Details im Text)

Methode	Rekonstruktionsfehler der Kalibrationspunkte RMS [mm] der Kamera-paare				Max
	1&2	2&3	3&4	2&4	
BA (alle Passpunkte)	13.48	15.39	14.78	14.41	15.39
VZ & BA (alle Passpunkte)	9.79	10.73	12.11	10.78	12.11
VZ & BA (Bildpunkte fest)	9.37	10.83	11.88	10.30	11.88
VZ & BA (Passpunkte fest)	9.36	10.63	11.86	10.36	11.86

fekte durch das Ausschließen der Bildkoordinaten oder der Passpunktkoordinaten aus dem Ausgleich zeigen sich jedoch nicht, alle $t(6) < .431$, alle $p > .68$. Das bedeutet, dass weder die Passpunktmessung noch die Bildpunktbestimmung separat eine signifikant größere Rekonstruktionsabweichung hervorrufen und somit eine der beiden als maßgebliche Abweichungsquelle identifiziert werden könnte.

Zusammenfassend kann aus diesen Daten geschlossen werden, dass bei der Anwendung der linearen DLT für die vorliegende Kameraanordnung beim Einsatz der Referenzrahmenkalibration mit manueller Digitalisierung eine Rekonstruktionsabweichung von maximal 18.95 mm bei der paarweisen Rekonstruktion entsteht. Diese wird vor allem durch das Kamerapaar 3/4 hervorgerufen. Durch eine Anwendung des Bündelblockausgleichs mit Verzeichnungskorrektur kann die Abweichung auf 12.11 mm reduziert werden. Diese Restabweichung ist durch Inkongruenzen in den Passpunktkoordinaten und aus der manuellen Digitalisierung bedingt, die nur durch höhere Passpunktgenauigkeiten³ und bessere Verfahren zur Bildpunktextraktion weiter reduziert werden kann. Die rekonstruierten Kamerazentren und Orientierungen für die analysierte Systemkonfiguration sind in Tabelle 5.8 dargestellt.

5.2.2 Dynamische Kalibration

Die dynamische Kalibration nach Svoboda u. a. (2005) könnte nicht nur die Kalibration größerer Messvolumen vereinfachen, sondern bietet auch aus theoretischer Sicht einen Ansatz zur Reduktion entstehender Ungenauigkeiten (vgl. Abschnitt 3.3.4). Da weder Genauigkeit noch Reliabilität dieses Verfahrens in Verbindung mit Consumer-Kameras bekannt sind, sollen diese in einem nächsten Schritt für das vorliegende Setup bestimmt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Systemgenauigkeit und Kalibrationsstabilität mit zunehmender An-

³Diese ergeben bedingt durch die manuelle Messung der Koordinaten und aufgrund der nicht sehr hohen Qualität des verwendeten Referenzrahmens mehr als die Hälfte der verbleibenden Abweichung.

5.2. Ergebnisse der realen Datensätze

Tab. 5.8: Mit der DLT-Methode berechnete Kamerazentren und Orientierungen: Links sind die Resultate mit Bündelblockausgleich und Verzeichnungskorrektur, rechts die Ergebnisse der linearen Methode dargestellt.

	mit BA, mit VZ	ohne BA, ohne VZ
Kamerazentren [mm]		
C1 X	3701.98	3694.38
C2 X	3709.16	3826.89
C3 X	-1888.37	-1980.41
C4 X	-1800.74	-1933.34
C1 Y	2776.69	2775.45
C2 Y	-1393.92	-1466.72
C3 Y	2675.30	2703.43
C4 Y	-1428.16	-1518.64
C1 Z	2510.02	2500.54
C2 Z	2493.21	2546.95
C3 Z	2472.05	2484.32
C4 Z	2504.96	2578.65
Orientierung der Kameras [°]		
Eulerwinkel RX C1	168.09	168.21
Eulerwinkel RX C2	18.59	19.09
Eulerwinkel RX C3	139.92	140.62
Eulerwinkel RX C4	-77.97	-78.54
Eulerwinkel RY C1	38.68	39.61
Eulerwinkel RY C2	-66.20	-66.34
Eulerwinkel RY C3	-122.21	-122.24
Eulerwinkel RY C4	42.21	43.12
Eulerwinkel RZ C1	43.56	43.61
Eulerwinkel RZ C2	126.89	126.67
Eulerwinkel RZ C3	-48.70	-49.40
Eulerwinkel RZ C4	135.86	135.42

zahl an Kameras noch weiter zunimmt, da die eingesetzten Verfahren der schrittweisen Rekonstruktion damit stabiler werden. Sowohl das Softwaremodul von Svoboda u. a. (2005), als auch die darin verwendete Bündelausgleichsmethode von Bouguet (1999) weisen sehr viele Konfigurationsparameter für die Kameraeigenschaften, als auch für das generelle Softwareverhalten auf. Ein umfassender Test der Parametereinflüsse würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Zudem wäre dieser nicht sinnvoll mit den vorliegenden realen Datensätzen umzusetzen, sondern auch hier würden sich in einem ersten Schritt Simulationen mit synthetischen Daten anbieten, bei denen die wahren Werte aller Größen bekannt sind, und somit isoliert der Einfluss der Methode betrachtet werden kann. Für den vorliegenden Fall sollen lediglich zwei Grundparameter verändert werden und deren Einfluss auf die erzielten Kameraparameter sowie ihre Unsicherheiten untersucht werden. Der eine Parameter bestimmt, ob ein Bündelblockausgleich durchgeführt wird oder nicht, und ist essentiell, da er die Rechenzeit stark be-

einflusst. Der andere Parameter gibt die Anzahl der verwendeten Punkte für die Kalibrationsroutine vor. Für die anderen Parameter werden für die vorliegende Systemkonfiguration sinnvolle Werte angenommen, die teils aus Datenblättern der Kamera, teils aus vorherigen Messungen und Hardware-Tests stammen. Die gesamte Parameterkonfiguration ist im Anhang A.5 in Tabelle A.1 zusammengefasst.

Bei der Durchführung der Kalibration erfolgen graphische Ausgaben, mit denen der Fortschritt und das Endresultat überprüft werden können: Zum einen werden die einzelnen Kameraansichten der Kalibrationspunkte graphisch dargestellt (Abb. 5.9). In diesen Ansichten werden nicht nur die gemessenen Positionen dargestellt, sondern auch die durch die interne RANSAC-Prozedur aufgrund zu großer Abweichungen vom restlichen Datensatz ausgeschlossenen (roten) Positionen und verzeichnungskorrigierten (grünen) Positionen. Die für den finalen Bündelblockausgleich genutzten Positionen sind blau dargestellt. Zusätzlich werden diese in einer dreidimensionalen Ansicht abgebildet (Abb. 5.10). Darüber hinaus werden die ermittelten intrinsischen Parameter und Verzeichnungskorrekturen der „Camera Calibration Toolbox“ angezeigt (Abb. 5.11). Außerdem wird auf Basis der einzelnen Kameraansichten das maximale Messvolumen in einer weiteren Ansicht als Punktwolke dargestellt (Abb. 5.12). Durch die Navigationsmöglichkeit in den dreidimensionalen Darstellungen wird eine interaktive Überprüfung auf vom aktuellen Kamerasetup nicht abgedeckte, z. B. jedoch für die zugrundeliegende Erfassungsaufgabe notwendige Bereiche ermöglicht. In einer weiteren graphischen Darstellung werden die zweidimensionalen Reprojektionsabweichungen aller Kameras berichtet (Abb. 5.13). Diese berechnen sich aus der Abweichung der rekonstruierten, verzeichnungskorrigierten und in die jeweilige Kameraansicht projizierten Kalibrationsstabpositionen und den korrespondierenden Bildpunkten dieser Kamera.

Zur Überprüfung der Stabilität des Softwaremoduls erfolgte eine mehrfache Kalibration auf Basis des gleichen Datensatzes und ein Vergleich der resultierenden Kamera- und Verzeichnungsparameter inklusive ihrer Unsicherheiten. Dabei wurde zusätzlich untersucht, inwieweit sich die ermittelten Kameraparameter verändern und die erzielbare Parameterunsicherheit reduziert werden kann, wenn zuvor die entwickelte Rolling-Shutter-Korrektur und der integrierte Bündelblockausgleich durchgeführt werden (Abschnitt 4.2.5). Die ermittelten extrinsischen Kameraparameter mit ihren Standardabweichungen aus je 10 Kalibrationen sind in Tabelle 5.9 zusammengefasst. Dabei beträgt die maximale Abweichung zum Mittelwert der bestimmten Positionen über alle Bedingungen 9.96 mm. Da die Standardabweichung der ermittelten Kamerazentren innerhalb der einzelnen Parametervarianten bereits maximal 14.77 mm beträgt, kann davon ausgegangen werden, dass die variierten Parametereinstellungen keinen relevanten Einfluss auf die bestimmten Positionen haben. Die ermittelten intrinsischen Kamerapara-

5.2. Ergebnisse der realen Datensätze

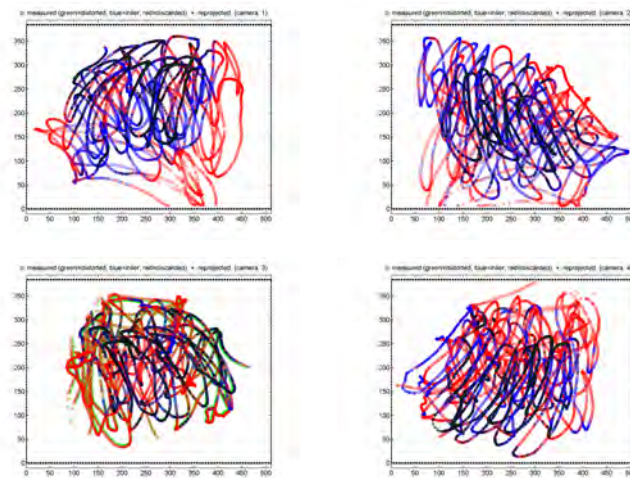


Abb. 5.9: Die vier Kameraansichten der Kalibrationsbewegung. Die blauen Punkte wurden nach der finalen RANSAC-Prozedur zum Bündelblockausgleich genutzt, die roten Punkte wurden verworfen. Grün dargestellt sind zeichnungskorrigierte Punkte.

meter und ihre Unsicherheiten sind in Tabelle 5.10 zusammengefasst. Aufgrund der Vielzahl der Parameter wurden hier lediglich der Mittelwert über alle Parametervarianten, die maximale Standardabweichung über alle Varianten und die Standardabweichung zwischen den einzelnen Varianten dargestellt. Auch hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den extrinsischen Parametern. Eine weitergehende statistische Auswertung der einzelnen Parametereinflüsse erscheint daher nicht sinnvoll.

Vergleicht man die entstehenden Reprojektionsabweichungen, so ergibt sich ein ähnliches Bild (Tabelle 5.11): Mit Bündelblockausgleich und Rolling-Shutter-Korrektur kann der Reprojektionsfehler im Mittel auf 0.27px ($SD=0.06\text{px}$) gesenkt werden, während ohne diese beiden zusätzlichen Prozessschritte die mittleren Reprojektionsabweichungen bei 0.30px ($SD=0.07\text{px}$) liegen. Eine multivariate Varianzanalyse über die Faktoren Kamera, Bündelausgleich (BA), und Rolling-Shutter-Korrektur zeigen allerdings trotz dieser geringen Verbesserungen Haupteffekte von Kamera und Bündelausgleich (Tabelle 5.12). Vergleicht man die Aufklärungsanteile, so wirken sich allerdings die verschiedenen Kameras um Faktor 10 stärker als der Bündelausgleich und um Faktor 200 stärker als die Rolling-Shutter-Korrektur aus. Der letztgenannte Effekt kann durch die bereits sehr langsame Bewegung des Kalibrationsstabs und daraus resultierenden geringen Rolling-Shutter-Verzerrungen bei der vorliegenden Aufnahme erklärt werden.

5. ERGEBNISSE

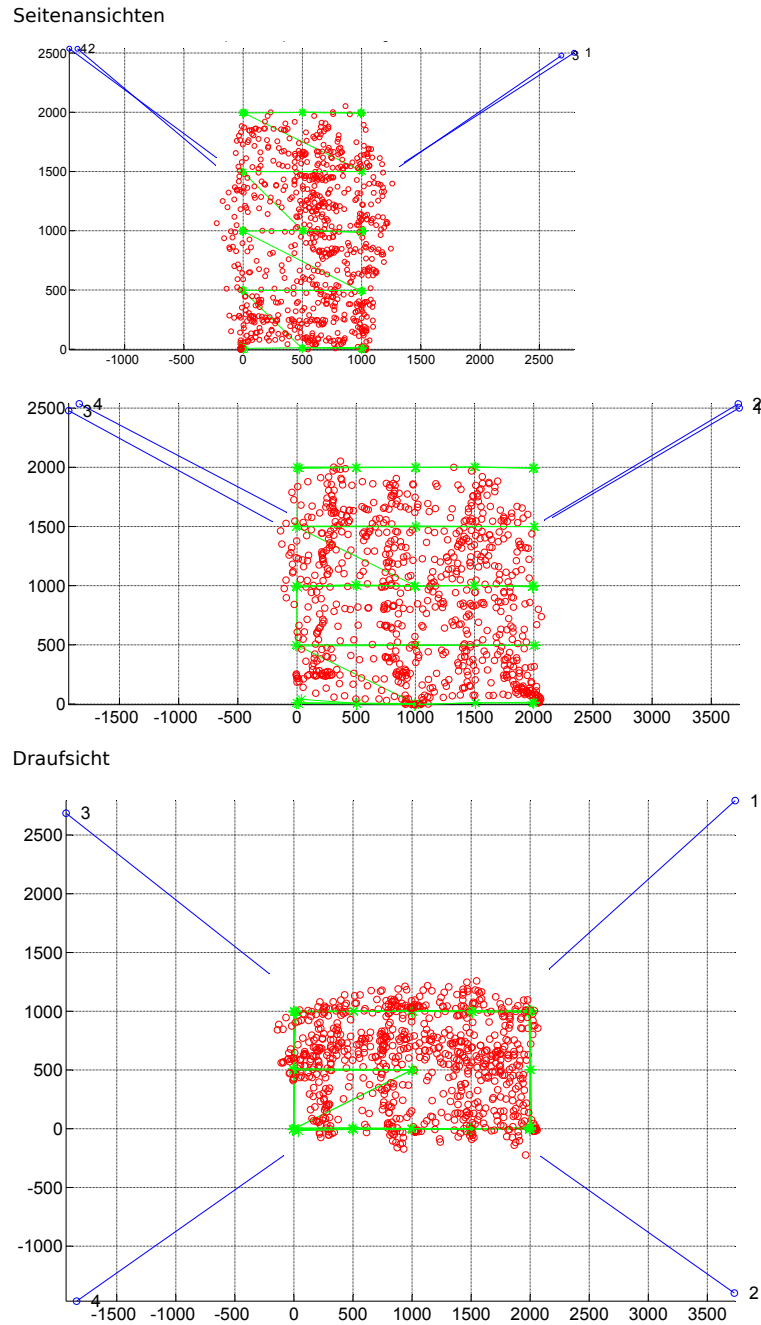


Abb. 5.10: Seitenansichten und Draufsicht der rekonstruierten Positionen des Kalibrationsmarkers (rot) und der Kamerapositionen und -orientierungen (blau). Zusätzlich wurden die digitalisierten Markerpunkte des Referenzrahmens rekonstruiert (grün). Alle Einheiten in [mm].

5.2. Ergebnisse der realen Datensätze

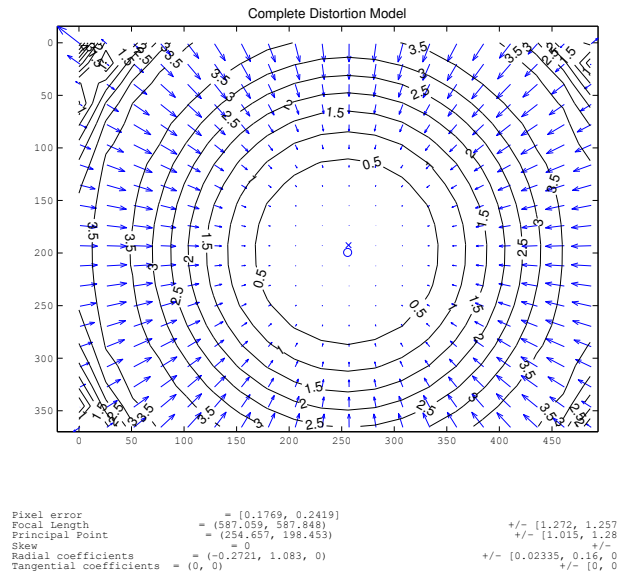


Abb. 5.11: Das Ergebnis der dynamischen Kalibrierung liefert zudem eine detaillierte Übersicht zu den Verzeichnungs- und Kameraparametern. Hier exemplarisch die ermittelten Werte einer Kamera des Vier-Kamera-Setups mit den zugeordneten Unsicherheiten.

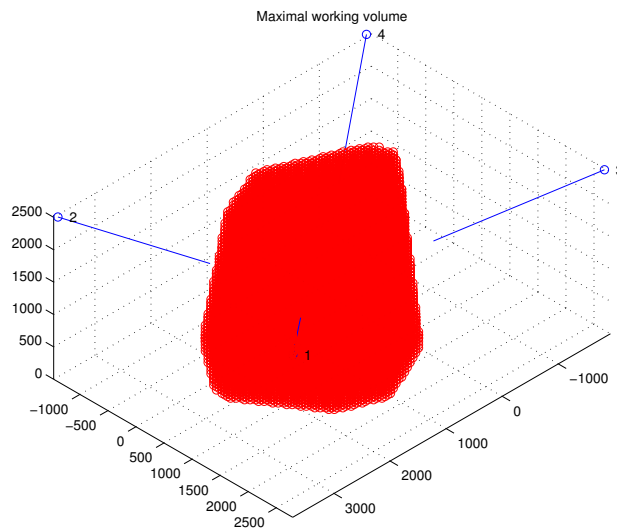


Abb. 5.12: Im Rahmen der Kalibrierung wird zusätzlich das maximale Aufnahmevolumen berechnet und dargestellt. Durch die Navigationsmöglichkeit innerhalb der Matlab-Umgebung, können damit leicht nicht erfassbare, für die Bewegungserfassung jedoch notwendige Aufnahmebereiche gefunden werden, die im Anschluss mit zusätzlichen Kameras abgedeckt werden können. Alle Einheiten in [mm].

5. ERGEBNISSE

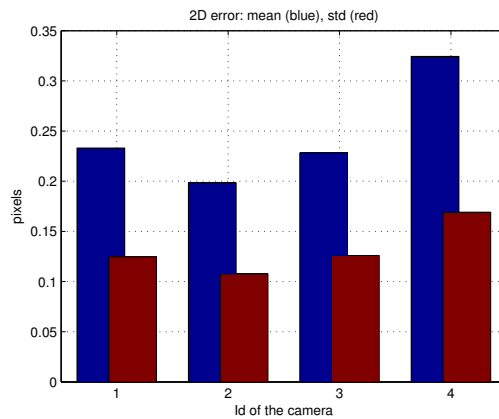


Abb. 5.13: Die zweidimensionalen Reprojektionsabweichungen der Kameras des Vier-Kamera-Setups nach dem finalen Ausgleich. Ohne Rolling-Shutter-Korrektur konnten im Mittel 0.25px Abweichung erreicht werden.

Ein weiterer Test bezog sich auf die Länge der Kalibrationsaufnahme. Die bereits berichteten Kalibrationen nutzten nur jeden 30. Wert aus den extrahierten Punkten. Dadurch wurde eine Kalibration mit ca. 1000 Kalibrationspunkten durchgeführt. In einer weiteren Kalibration mit Bündelblockausgleich und Rolling-Shutter-korrigierten Bildkoordinaten wurden 7000 Kalibrationspunkte genutzt. Dabei konnte in einem Durchgang eine mittlere Reprojektionsabweichung von 0.29px ($SD=0.18px$) erreicht werden. Da die Laufzeit der Kalibrationsroutine bei einem solchen Umfang an Kalibrationspunkten über zwei Stunden betrug, wurden keine Mehrfachmessungen durchgeführt. Zum einen ist eine solche Kalibrationsdauer für die spätere praktische Anwendung nicht sinnvoll, zum anderen zeigten sich in diesem ersten Versuch auch keine Verbesserungen der Kalibrationsgüte, die eine solche Anwendung rechtfertigen würden.

Die Einflüsse der Parameterveränderungen könnten zudem bereits durch die im Softwaremodul implementierten Verfahren zur Ausreißerdetektion verhindert werden. Diese stellen sicher, dass das Ausgleichsverfahren trotz eventuell vorliegender grober Abweichungen, z. B. durch Störungen bei der Kalibrationsstaberkenkung, stabil zu einer Lösung findet. Dementsprechend sind die verbleibenden Ungenauigkeiten vermutlich durch die nur bildgenau synchronisierte Erfassung und Abweichungen bei der Bildverarbeitung bedingt. Diese können systematische Effekte hervorrufen, die nicht durch den Bündelblockausgleich korrigiert werden können.

Tab. 5.9: Mittelwerte und Standardabweichungen von je zehn mit dem gleichen Datensatz berechneten dynamischen Kalibrationen. Dabei wurden zusätzlich die Faktoren Bündelblockausgleich (BA) und Rolling-Shutter-Korrektur (RS) variiert.

	ohne BA ohne RS-Korr.		mit BA ohne RS-Korr.		ohne BA mit RS-Korr.		mit BA mit RS-Korr.	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Kamerazentren [mm]								
Kamerazentrum C1 X	3715.31	7.47	3719.12	14.77	3715.29	9.45	3729.86	7.41
Kamerazentrum C2 X	3709.31	5.63	3718.90	7.32	3708.22	9.52	3724.05	6.65
Kamerazentrum C3 X	-1906.01	6.67	-1915.98	15.10	-1908.21	8.79	-1916.42	10.89
Kamerazentrum C4 X	-1848.10	11.80	-1852.65	6.03	-1840.85	16.43	-1858.71	8.18
Kamerazentrum C1 Y	2767.75	6.77	2771.76	10.18	2770.02	7.19	2778.00	6.13
Kamerazentrum C2 Y	-1382.89	4.25	-1388.43	4.63	-1382.57	6.31	-1391.82	4.12
Kamerazentrum C3 Y	2663.89	4.52	2672.52	11.88	2665.72	6.19	2671.97	7.46
Kamerazentrum C4 Y	-1467.38	6.92	-1471.34	3.16	-1463.78	9.56	-1474.67	5.35
Kamerazentrum C1 Z	2476.33	10.06	2478.80	6.80	2481.96	11.64	2479.17	5.93
Kamerazentrum C2 Z	2524.10	4.30	2527.12	5.56	2525.90	3.89	2527.84	4.18
Kamerazentrum C3 Z	2463.06	5.33	2467.58	12.79	2468.01	6.89	2465.04	5.61
Kamerazentrum C4 Z	2534.35	3.69	2537.16	6.67	2534.21	4.86	2536.23	3.19
Orientierung der Kameras [°]								
Eulerwinkel RX C1	58.05	0.18	58.22	0.31	57.83	0.52	58.47	0.23
Eulerwinkel RX C2	-42.11	0.12	-42.07	0.16	-42.22	0.27	-42.16	0.07
Eulerwinkel RX C3	113.27	0.12	113.16	0.20	113.43	0.35	112.99	0.16
Eulerwinkel RX C4	-49.77	0.14	-49.91	0.20	-49.69	0.13	-50.06	0.13
Eulerwinkel RY C1	-47.50	0.12	-47.47	0.20	-47.46	0.21	-47.55	0.12
Eulerwinkel RY C2	68.44	0.09	68.54	0.15	68.37	0.11	68.66	0.10
Eulerwinkel RY C3	56.02	0.17	56.21	0.22	55.98	0.36	56.49	0.22
Eulerwinkel RY C4	45.45	0.13	45.49	0.14	45.58	0.12	45.61	0.13
Eulerwinkel RZ C1	-118.62	0.12	-118.48	0.16	-118.65	0.27	-118.26	0.17
Eulerwinkel RZ C2	-54.18	0.19	-54.14	0.19	-54.07	0.22	-54.34	0.14
Eulerwinkel RZ C3	48.98	0.17	49.05	0.20	48.89	0.16	49.13	0.15
Eulerwinkel RZ C4	-63.86	0.14	-63.83	0.14	-63.78	0.16	-63.98	0.10

Tab. 5.10: Intrinsische Kameraparameter: Mittelwerte und Standardabweichungen innerhalb (*SD inn.*) von je zehn mit dem gleichen Datensatz berechneten dynamischen Kalibrationen. Dabei wurden zusätzlich die Faktoren Bündelblockausgleich (BA) und Rolling-Shutter-Korrektur (RS) variiert und die Standardabweichung bestimmt (*SD zw.*).

	Kamera 1			Kamera 2			Kamera 3			Kamera 4		
	<i>M</i>	<i>SD inn.</i>	<i>SD zw.</i>	<i>M</i>	<i>SD inn.</i>	<i>SD zw.</i>	<i>M</i>	<i>SD inn.</i>	<i>SD zw.</i>	<i>M</i>	<i>SD inn.</i>	<i>SD zw.</i>
Brennw. x [px]	585.2157	3.0680	1.7109	592.6682	3.0865	1.7348	588.9797	3.3931	1.3777	595.7126	4.1707	2.3330
-Uns. [px]	1.3633	0.1099	0.0570	1.5196	0.1394	0.0363	1.2206	0.1223	0.0275	1.9906	0.1106	0.0565
Brennw. y [px]	586.0244	2.8881	1.1975	585.6274	3.0221	0.6608	581.9361	3.2921	0.2951	595.5827	3.7032	1.5687
-Uns. [px]	1.3542	0.1153	0.0573	1.4806	0.1452	0.0379	1.2271	0.1201	0.0253	1.9835	0.1102	0.0637
Rad. Verz. T.1	-0.2584	0.0085	0.0095	-0.2356	0.0108	0.0027	-0.2372	0.0131	0.0048	-0.2168	0.0122	0.0138
-Uns.	0.0237	0.0031	0.0007	0.0202	0.0033	0.0006	0.0360	0.0025	0.0004	0.0359	0.0030	0.0017
Rad. Verz. T.2	0.6307	0.0776	0.1477	0.4062	0.0748	0.0540	0.6558	0.1431	0.0354	0.3569	0.0805	0.0380
-Uns.	0.1583	0.0275	0.0049	0.1042	0.0328	0.0046	0.3399	0.0287	0.0046	0.2559	0.0290	0.0148
Rad. Verz. T.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-Uns.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tang. Verz. T.1	0.0001	0.0007	0.0007	-0.0010	0.0011	0.0006	0.0016	0.0008	0.0002	-0.0023	0.0008	0.0002
-Uns.	0.0009	0.0001	0.0000	0.0011	0.0001	0.0000	0.0010	0.0001	0.0000	0.0015	0.0001	0.0000
Tang. Verz. T.	0.0005	0.0008	0.0003	-0.0003	0.0007	0.0004	0.0014	0.0007	0.0001	0.0005	0.0007	0.0003
-Uns.	0.0010	0.0001	0.0000	0.0013	0.0001	0.0000	0.0011	0.0001	0.0000	0.0017	0.0001	0.0000

Tab. 5.11: 2D-Reprojektionsfehler: Mittelwerte und Standardabweichungen von je zehn mit dem gleichen Datensatz berechneten dynamischen Kalibrationen. Dabei wurden zusätzlich die Faktoren Bündelblockausgleich (BA) und Rolling-Shutter-Korrektur (RS) variiert.

	ohne BA ohne RS-Korr.		mit BA ohne RS-Korr.		ohne BA mit RS-Korr.		mit BA mit RS-Korr.	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Kam. 1: <i>M</i> :	0.2554	0.0029	0.2310	0.0043	0.2529	0.0072	0.2272	0.0043
Kam. 1: <i>SD</i> :	0.1533	0.0045	0.1254	0.0035	0.1526	0.0098	0.1232	0.0035
Kam. 2: <i>M</i> :	0.3387	0.0064	0.3060	0.0254	0.3250	0.0245	0.2958	0.0222
Kam. 2: <i>SD</i> :	0.2217	0.0035	0.1822	0.0176	0.2139	0.0197	0.1758	0.0184
Kam. 3: <i>M</i> :	0.2172	0.0069	0.2266	0.0033	0.2151	0.0046	0.2245	0.0053
Kam. 3: <i>SD</i> :	0.1359	0.0095	0.1156	0.0036	0.1357	0.0093	0.1146	0.0025
Kam. 4: <i>M</i> :	0.3955	0.0067	0.3564	0.0315	0.3932	0.0161	0.3524	0.0160
Kam. 4: <i>SD</i> :	0.2195	0.0023	0.1951	0.0179	0.2169	0.0117	0.1947	0.0110

5. ERGEBNISSE

Tab. 5.12: Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse der Einflussfaktoren auf die Reprojektionsabweichungen der dynamischen Kalibration

	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Kamera	0.597	3	0.199	900.577	0.0000
BA	0.019	1	0.019	84.718	0.0000
RS-Korr.	0.001	1	0.001	4.694	0.0319
Kamera*BA	0.014	3	0.005	21.018	0.0000
Kamera*RS-Korr.	0.001	3	0.000	0.967	0.4101
BA*RS-Korr.	0.000	1	0.000	0.001	0.9819
Kamera*BA*RS-Korr.	0.000	3	0.000	0.063	0.9793
Error	0.032	144	0.000		
Total	0.664	159			

5.2.3 Auswertung Markercluster

Die im vorigen Abschnitt ermittelten Reprojektionsabweichungen stellen ein Maß für die interne Genauigkeit des Verfahrens dar (vgl. Abschnitt 3.3.7). Im Folgenden werden daher mit den ermittelten Kameraparametern rigide Markercluster rekonstruiert. Diese bieten die Möglichkeit einer Genauigkeitsprüfung durch den Vergleich der rekonstruierten Markerabstände mit den durch externe Referenzmessungen gewonnenen Markerabständen (vgl. Abschnitt 4.3). Zudem kann mit dieser Methode ein Vergleich zur Referenzrahmenkalibration gezogen werden, wenn die Rekonstruktion zusätzlich mit den dort bestimmten Kameraparametern erfolgt. Für das vorliegende System ist diese Messung besonders relevant, da mit ihr die verbleibenden Abweichungen durch die Asynchronität der Kameras bestimmt werden können. Zudem wird die implementierten Trajektorienbestimmung mit mehreren Markern überprüft.

Bei der Auswertung der Markerclustervideos konnte die prinzipielle Funktionalität der implementierten Trajektorienbestimmung bestätigt werden. Sowohl für die Messung mit einem, als auch mit zwei Markerclustern konnten Trajektorien extrahiert werden. Allerdings nahm die Anzahl an rekonstruierten Trajektorien bei vielen Überdeckungen und Markervereinigungen sehr stark zu. Dies ist auf die rein statische Minimierung der Distanzunterschiede von Bild zu Bild im genutzten Trackingalgorithmus zurückzuführen. Für Fälle mit vielen Markern und vielen Überdeckungen empfiehlt sich daher die Implementierung eines Trackingalgorithmus, der die Dynamik in die Zuweisung miteinbezieht. Beispielsweise bietet sich dort der Kalman-Filter an (vgl. Abschnitt 4.2.4). Für die vorliegenden Auswertungen waren die implementierten Methoden jedoch ausreichend.

Für die Auswertung der Distanzunterschiede wurde ein Zeitraum von 1000 Bildern aus den Markertrajektorien herangezogen, in denen sich das Objekt mit langsamer Absolutgeschwindigkeit (<10 mm/Bild) bewegte. Zusätzlich wurde ein ebenfalls 1000 Bilder langer Zeitraum gewählt, in dem die Objektgeschwindig-

keit mindestens 20 mm/Bild betrug. Dies wurde sowohl für die dynamische Kalibration als auch für die Referenzrahmenkalibration mit DLT, Verzeichnungskorrektur und anschließendem Bündelblockausgleich durchgeführt. In Tabelle 5.13 sind die Unterschiede der Markerabstände bei der Rekonstruktion mit und ohne Bündelblockausgleich und die Referenzwerte aus einer externen Messung mit dem VICON-System dargestellt. Die absoluten Abweichungen von den mit VICON ermittelten Distanzen betragen für beide Systeme ohne Bündelblockausgleich 3.3 mm und bei der Anwendung des Bündelblockausgleichs unter 1 mm. Damit können größere systematische Skalierungsfehler ausgeschlossen werden. Im Vergleich zur Referenzrahmenkalibration sind die Standardabweichungen für die dynamische Kalibration noch geringer, was auf eine konsistentere Bündelblockausgleichung und geringere systematische Fehler zurückgeführt werden kann. Vergleicht man die Distanzen in Abhängigkeit von der Objektgeschwindigkeit, so kann deskriptiv eine Zunahme der Standardabweichungen bei schnellerer Objektgeschwindigkeit festgestellt werden. Diese können auf die trotz Rolling-Shutter-Korrektur und Synchronisierung verbleibenden Restabweichungen durch die nicht exakt zeitgleiche Bildaufnahme zurückgeführt werden.

Insgesamt kann jedoch bei der vorliegenden Systemkonfiguration und bei Anwendung des Bündelblockausgleichs über alle rekonstruierten Punkte eine sehr gute Rekonstruktionsgenauigkeit bestätigt werden. Diese beträgt unter einem Millimeter systematischer Abweichung zur Referenzmessung bei einer Standardabweichung von maximal 1.225 mm für die dynamische Kalibration bzw. 1.496 mm für die Referenzrahmenkalibration mit Verzeichnungskorrektur und anschließendem Bündelblockausgleich. Dabei ist davon auszugehen, dass mit weiterer Zunahme der Objektgeschwindigkeit die Abweichungen aufgrund der nicht iterativ optimierten Asynchronität der Kameras zueinander weiter ansteigen werden. Diese könnten durch das im Abschnitt 4.2.6 beschriebene Verfahren zur subframe-genauen Synchronisierung reduziert werden. Das Verfahren wird jedoch für die vorliegende Bewegung als nicht notwendig erachtet, da der Unterschied zwischen langsamer und schneller Objektbewegung lediglich $0.34\text{px } SD$ beträgt.

5. ERGEBNISSE

Tab. 5.13: Markerclustermessung: Rekonstruierte Markerabstände für die zwei implementierten Kalibrationsalgorithmen mit anschließendem Bündelblockausgleich und Vergleich zu den mit VICON ermittelten statischen Referenzwerten. Beide Methoden können die Markerabstände mit einer Abweichung von weniger als 1 mm zur Referenz rekonstruieren. Bei höheren Objektgeschwindigkeiten nimmt die Standardabweichung trotz Rolling-Shutter-Korrektur zu.

	Distanz 1 [mm]	Distanz 2 [mm]	Distanz 3 [mm]
Dyn. Kalibration, langsam			
<i>M</i>	116.546	117.570	172.691
<i>SD</i>	0.894	0.677	0.664
Dyn. Kalibration, schnell			
<i>M</i>	116.356	117.233	172.384
<i>SD</i>	1.041	1.020	1.225
DLT mit VZ & BA, langsam			
<i>M</i>	116.530	117.871	172.678
<i>SD</i>	0.809	0.967	0.959
DLT mit VZ & BA, schnell			
<i>M</i>	116.523	118.152	173.026
<i>SD</i>	1.245	1.353	1.496
VICON, statische Referenzmessung			
<i>M</i>	116.798	117.303	172.512
<i>SD</i>	0.013	0.016	0.020

5.3 Ergebnisse der Validierungsmessung

Bei der Validierungsmessung mit dem VICON-System konnte mit der dynamischen Kalibration eine mittlere Reprojektionsabweichung von 0.28px ($SD=0.19px$) über alle Kameras erreicht werden. Somit kann trotz anderer Systemkonfiguration von einer ähnlichen internen Genauigkeit der Kalibration ausgegangen werden wie in den in Abschnitt 5.2.2 berichteten Tests. Dies gibt einen weiteren Hinweis auf die Stabilität der implementierten Methoden.

Vergleicht man die von beiden Systemen rekonstruierten Positionen des Kalibrationsstabs, so beträgt die maximal auftretende Abweichung 4.126 mm über das gesamte Messvolumen (Tabelle 5.14). Der Mittelwert über alle Abweichungen liegt bei 0.073 mm und weist damit auf einen zu vernachlässigenden systematischen Fehler hin. Die zwingende Voraussetzung für eine solche Güte ist jedoch ein möglichst exakt vermessenes Kalibrationsobjekt. Dies konnte im vorliegenden Fall durch die direkte Messung mit VICON sichergestellt werden. Im Vergleich zur Referenzrahmenkalibration ist die Güte dieses Referenzobjektes aufgrund der vergleichsweise geringen Größe jedoch wesentlich leichter zu erreichen. Die Variabilität der Abweichungen wird durch die Standardabweichung

5.3. Ergebnisse der Validierungsmessung

Tab. 5.14: Absolute Abweichungen zwischen den mit dem Konstanzer System und dem VICON-System rekonstruierten Positionen des Kalibrationsstabs und der zur Bestimmung des Unterarmflexionswinkels verwendeten Marker

Abweichung Kalibrationsstabpositionen	
<i>M</i>	0.073 mm
<i>SD</i>	1.486 mm
<i>MAX</i>	4.126 mm
<hr/>	
Abweichung Armmarkerpositionen	
<i>M</i>	0.076 mm
<i>SD</i>	1.623 mm
<i>MAX</i>	4.932 mm

von 1.486 mm charakterisiert. Damit wird ausgedrückt, dass die Abweichungen von ca. 68% aller Messungen weniger als 1.5 mm betragen. Dies übertrifft die erwartete Genauigkeit für eine Rekonstruktion über das gesamte Messvolumen, kann allerdings auf die sehr langsame Stabbewegung mit Pausen bei der Kalibration zurückgeführt werden.

Bei der Armbeugebewegung werden aufgrund der höheren Objektgeschwindigkeiten größere Abweichungen der Markerpositionen erwartet. Dort beträgt die maximal aufgetretene Abweichung 4.932 mm, bei einem Mittelwert von 0.076 mm und einer Standardabweichung von 1.623 mm. Insgesamt jedoch sind diese geringen Unterschiede sehr positiv zu interpretieren, da damit eine korrekte Funktionalität der entwickelten Software bestätigt werden kann.

Für die Winkelbestimmung der Unterarmflexion wurde ein Bewegungszyklus vom komplett gestreckten Arm bis zur vollständigen Flexion und zurück zur vollständigen Extension ausgewertet (Abb. 5.14). In Abbildung 5.15 sind die ermittelten Winkel über die Zeit abgetragen. Dabei wurde der Offset des Winkels im gestreckten Zustand auf 180° korrigiert. Ein Vergleich des so bestimmten Flexionswinkels mit dem von VICON ermittelten, ebenfalls offsetkorrigierten Winkel ergab einen mittleren systematischen Unterschied von -0.105° bei einer Standardabweichung von 0.873° . Sowohl der systematische als auch der variable Unterschied ist bei unter Beachtung anderer bei der Bewegungserfassung auftretender Unsicherheitsfaktoren zu vernachlässigen (z. B. Soft-Tissue-Artefakte, vgl. Abschnitt 2.4.3). Zwar ist davon auszugehen, dass bei schnelleren Bewegungen die Abweichungen aufgrund der nicht iterativ optimierten Asynchronität der Kameras zueinander zunehmen werden; diese können jedoch, falls notwendig und wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, durch das im Abschnitt 4.2.6 beschriebene Verfahren zur subframe-genauen Synchronisierung verringert werden.

5. ERGEBNISSE

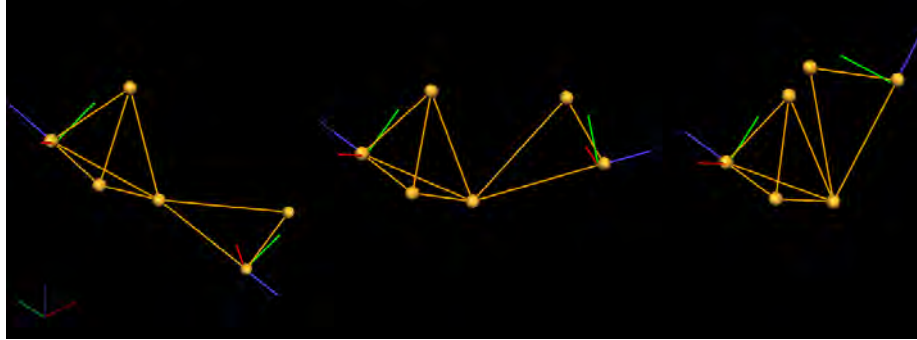


Abb. 5.14: VICON-Rekonstruktion an drei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten der Unterarmflexionsbewegung. Die Auswertung erfolgte über den kompletten Bewegungszyklus von Streckung (linkes Bild) über die Beugung (rechtes Bild) zur Streckung.

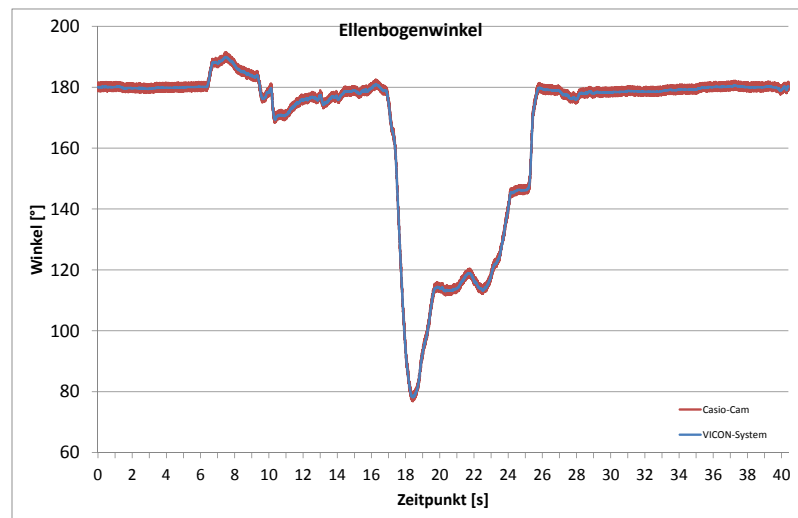


Abb. 5.15: Vergleich des mit VICON rekonstruierten Winkelverlaufs der Unterarmflexion mit dem Winkelverlauf aus dem Konstanzer System: Die Abweichungen betragen im Mittel -0.105° bei einer Standardabweichung von 0.873° .

5.4 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden die Ergebnisse der Simulationen und System- und Validierungstests beschrieben. Das Ziel war zum einen innerhalb der Simulationsumgebung das generelle Systemverhalten im Bezug auf auftretende Abweichungen zu verstehen, zum anderen sollten Größen zur Einschätzung der entstehenden Messunsicherheit gefunden werden. Darüber hinaus wurde die von Anwenderseite her zu bevorzugende dynamische Kalibrationsmethode nach Svoboda u. a. (2005) auf ihre Reliabilität und Genauigkeit hin untersucht. Auf Basis dieser Messungen wurden die Abweichungen der Markerabstände von rigiden Markerclustern in einer dynamischen Situation bestimmt. Abschließend erfolgte eine Validierungsmessung der dynamischen Kalibration und der implementierten Rekonstruktionsalgorithmen anhand einer Parallelmessung mit dem VICON-System des Instituts für Sportwissenschaft der Universität Bern. Dabei wurde zudem die generelle Anwendbarkeit des Systems für die Bewegungserfassung anhand einer Winkelbestimmung der Unterarmflexion überprüft. Die wichtigsten Erkenntnisse aus diesen Tests werden im Folgenden stichpunktartig zusammengefasst:

- Die Rekonstruktionsabweichung ist ein valides Maß für die statische Genauigkeit des Messsystems. Für das vorliegende Systemsetup konnte diese zudem bei der Verwendung der entwickelten Software für die durch Consumer-Kameras auftretende Abweichungen als guter Prädiktor für die maximal in (den betrachteten) dynamischen Situationen entstehenden Abweichungen angesehen werden.
- Zur Kalibration genutzte Passpunkte sollten jedoch nicht zur Prädiktion von Rekonstruktionsabweichungen für eine spätere Messung genutzt werden. Der durch sie ermittelte Fehler ist insbesondere bei zusätzlichen Verzeichnungs-korrekturen durch die dabei auftretende Überanpassung wesentlich geringer als der Fehler der nicht zur Kalibration genutzten Passpunkte.
- Der Bündelblockausgleich kann auch für die manuelle Referenzrahmenkalibration eine starke Reduktion der Rekonstruktionsabweichungen erzielen. Dieser sollte daher immer sowohl für die Kalibration selbst, als auch bei der Rekonstruktion in der Bewegungserfassungsphase angewendet werden. Dabei muss jedoch vor der Ausgleichsrechnung ein robustes Verfahren zum Ausschluss vorhandener Ausreißern eingesetzt werden.
- Treten hauptsächlich systematische Abweichungen auf, kann der Bündelblockausgleich das Rekonstruktionsergebnis nicht signifikant verbessern.

5. ERGEBNISSE

- Im Gegensatz zur Kalibrationsphase haben in der Bewegungserfassungsphase die Digitalisierabweichungen den größten Einfluss auf die Rekonstruktionsabweichungen.
- Bei den analysierten Bewegungen konnte ein Einfluss der Objektgeschwindigkeit auf die entstehende Rekonstruktionsabweichung festgestellt werden. Dies liegt an der nicht exakt zeitgleichen Aufnahme der einzelnen Kameras und der nicht iterativ optimierten Rekonstruktionsabweichungen. In der Literatur wird bestätigt, dass mit den iterativen Methoden die Abweichungen stark verringert werden können (vgl. Abschnitt 4.2.6). Für die aktuelle Systemimplementierung erscheint die mit einer bildgenauen Abtastung erreichbare Messunsicherheit als ausreichend.
- Für das Konstanzer System beträgt die ermittelte Rekonstruktionsabweichung für die Referenzrahmenkalibration bei Anwendung von Bündelblockausgleich und Verzeichnungskorrektur mit Kamerapaaren 14.99 mm. Für die dynamische Kalibration wurden mindestens drei Kameras zur Rekonstruktion genutzt. Damit ergeben sich im Vergleich zum VICON-System Rekonstruktionsunterschiede mit einem mittleren Offset von 0.073 mm und einer Standardabweichung von 1.486 mm. Dabei ist anzunehmen, dass auch diese mit zunehmender Objektgeschwindigkeit zunehmen und den Einsatz von zusätzlichen iterativen Synchronisierungsverfahren notwendig machen.
- Anhand der Bestimmung des Unterarmflexionswinkels konnte die Praxistauglichkeit des entwickelten Systems bestätigt werden.

Schlussbetrachtungen

6.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein System für die dreidimensionale Bewegungserfassung mit Consumer-Highspeedkameras entwickelt. Vor allem für die Bewegungserfassung in der Sportwissenschaft sind solche Systeme sehr interessant, da sie im Gegensatz zu den kommerziellen Systemlösungen (vgl. Abschnitt 2) einen flexiblen Anwendungsbereich bei gleichzeitiger Kosteneffizienz bieten und damit der Vielfältigkeit der zu erfassenden (sportlichen) Bewegungen gerecht werden können. Aus diesem Grund werden bereits jetzt schon Kameras dieser Art zur Bewegungserfassung eingesetzt. Im entwickelten System kommen 12 Kameras des Typs Casio Exilim Pro EX-F1 zur Anwendung (vgl. Abschnitt 4.1). Die Besonderheit dieser Kamera ist die hohe zeitliche Auflösung, die Vorteile bei der Erfassung schneller sportlicher Bewegungen bietet. Aufgrund einiger fundamentaler Unterschiede zu kommerziell eingesetzten Bewegungserfassungskameras (vgl. Abschnitt 2.3 und 3) ist es jedoch fraglich, ob Systeme mit Consumer-Kameras den wissenschaftlichen Gütekriterien gerecht werden können.

Um diese Frage zu beantworten, wurde in einem ersten Schritt die zur Quantifizierung der Güte solcher Messsysteme relevante Größe der Messunsicherheit eingeführt. Im Bereich der Metrologie existiert zur Bestimmung dieser Größe eine im *Guide to the evaluation of uncertainty in measurement* (GUM) definierte, standardisierte Vorgehensweise (Abschnitt 2.4.2). Ein Literaturreview über Messunsicherheiten in der Bewegungserfassung zeigt jedoch, dass kein einziges System nach dieser Vorgehensweise validiert wurde, sondern es wurden – in den wenigen gefundenen Validierungsstudien – meist mittlere Rekonstruktionsabweichungen bekannter Passpunkte auf Objekten im Messvolumen bestimmt und zur Angabe der Systemgenauigkeit genutzt. Aus diesem Umstand ergab sich neben der konkreten Systementwicklung für die weitere Arbeit die Forschungsfrage, wie eine (automatisierte) Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM für die dreidimensionale Erfassung menschlicher Bewegung mit Consumer-Kameras erfolgen kann. Parallel dazu wurde evaluiert, welche methodischen Änderungen die ent-

stehende Messunsicherheit generell reduzieren können. Mit einer Beantwortung dieser Fragen könnte der Umstand behoben werden, dass mangels Alternativen diese Systeme im (sport-)wissenschaftlichen Umfeld eingesetzt werden, ohne die dabei entstehenden Messabweichungen zu kennen.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde nach der im GUM vorgeschlagenen Struktur vorgegangen. Dabei wurden jeweils parallel zu den Prozessschritten der Messunsicherheitsbestimmung Möglichkeiten zur Genauigkeitssteigerung und zur Automatisierung des Bewegungserfassungsprozesses untersucht. Nach der Definition der Messgröße, die im vorliegenden Fall als eine Trajektorienmatrix identifiziert wurde, erfolgt nach GUM die Bestimmung aller unsicherheitsrelevanten Eingangsgrößen. Da diese je nach Prozessvariante unterschiedlich sind, wurden die für den Messprozess relevanten, in Abb. 2.10 dargestellten Einzelschritte separat behandelt. Dazu wurden zuerst die Kameras als die Hauptkomponenten eines solchen Messsystems betrachtet (Abschnitt 3.1). Dabei wurden literaturbasiert generelle Hardwareeigenschaften und Besonderheiten bei Consumer-Kameras ermittelt und Methoden zur mathematischen Modellierung beschrieben (Abschnitt 3.2). Im anschließenden Abschnitt 3.3 wurden detailliert Methoden zur Parameterbestimmung der mathematischen Modelle erarbeitet; dies vor allem im Hinblick auf die Möglichkeit, zugeordnete Unsicherheiten zu bestimmen.

Bei diesen Ausarbeitungen wurde klar, dass die Eigenschaften der verwendeten Kameras einen starken Einfluss auf die resultierende Messunsicherheit haben. Daher wurden vor der Wahl der Methoden zur konkreten Systementwicklung die für die Bewegungserfassung relevanten Hardwareeigenschaften der Casio Exilim Pro EX-F1 ermittelt. Dazu wurden sowohl Tests aus einem Photo-Testlabor genutzt sowie eigene Hardware- und Funktionstests durchgeführt (Abschnitt 4.1). Diese bestanden unter anderem aus Untersuchungen zur Repositioniergenauigkeit des Kameraobjektivs sowie zur Bestimmung der Videobildrate und der Rolling-Shutter-Verzögerung.

Anschließend wurden die neben der Kameramodellierung relevanten Prozessschritte eines Bewegungserfassungssystems erarbeitet (Abschnitt 4.2). Dazu wurden verschiedene Methoden der Bildverarbeitung zur Extraktion der relevanten Punkte aus den Videos, Methoden zur Rolling-Shutter-Korrektur und Möglichkeiten der Software-Synchronisierung von nicht zeitgleich erfolgenden Kameraaufnahmen untersucht. Im daran anschließenden Abschnitt 4.3 wurden die für das vorliegende System ausgewählten und implementierten Methoden dargestellt. Darüber hinaus wurden die durchgeführten Tests mit der entwickelten Simulationsumgebung und mit realen Datensätzen erläutert. Abschließend erfolgte eine theoretische Messunsicherheitsbetrachtung für die implementierten Systemvarianten. Dabei wurde der komplette Prozess der Kalibrations- und Bewegungserfassungsphase im Bezug auf die entstehenden Unsicherheiten und die zur Propagierung notwendigen Messmodelle und Bestimmungsverfahren ana-

lysiert. Nach einer Implementierung der Verfahren sollte somit bereits aus der Simulationsumgebung eine Prädiktion der in der Bewegungserfassungsphase zu erwarteten Messunsicherheit möglich sein.

Im abschließenden Abschnitt 5 wurden die Ergebnisse aus den Simulationen, Tests und Validierungsmessungen beschrieben. In den Simulationen zur Referenzrahmenkalibration konnte bestätigt werden, dass die Überprüfung der entstehenden Reprojektionsabweichungen mit zur Kalibration verwendeten Passpunkten vor allem beim Einsatz von Verzeichnungskorrekturen zu einer starken Unterschätzung der tatsächlich auftretenden Abweichungen führt (Abschnitt 5.1). Daher wird bei der Anwendung der Referenzrahmenkalibration für die Abschätzung der Abweichungen unbedingt eine Nutzung von nicht zur Kalibration herangezogenen Passpunkten empfohlen. Des Weiteren machen die Simulationen deutlich, dass auch bei ungenauen Passpunktkoordinaten die Anwendung einer Bündelausgleichsmethode die entstehenden Rekonstruktionsabweichungen stark reduzieren kann. Idealerweise geschieht dies in Kombination mit automatisch subpixelgenau extrahierbaren Markern auf den Passpunkten, da somit auch die durch manuelle Digitalisierung entstehenden Fehleranteile reduziert werden können. Treten systematische Ungenauigkeiten der Passpunkte auf, so können diese dadurch jedoch nicht korrigiert werden. Zudem können diese systematischen Abweichungen auch nur durch die Aufnahme und Rekonstruktion nicht zur Kalibration verwendeter Passpunkte detektiert werden. Eine abschließende Simulation eines im Messvolumen zufällig platzierten Stabes macht den großen Einfluss der Digitalisiergenauigkeit auf die Rekonstruktionsabweichungen deutlich. Daraus kann abgeleitet werden – wenn möglich – automatisierte subpixelgenaue Methoden zu nutzen, um auch bei der Anwendung einer Referenzrahmenkalibration die entstehenden Rekonstruktionsabweichungen minimal zu halten.

Die Genauigkeit der Referenzrahmenkalibration für die Systemkonfiguration im Konstanzer Labor wurde in einem anschließenden Schritt anhand von realen Datensätzen überprüft. Dabei betrug die minimal erreichbare Rekonstruktionsabweichung mit Verwendung von Bündelblockausgleich und Verzeichnungskorrektur 14.99 mm. Ordnet man diesen Wert den in den Simulationen ermittelten Abweichungen bei Anwendung eines Bündelausgleichs zu (Abb. 5.4, rechte Seite), so kann man von Digitalisierabweichungen der Passpunktkoordinaten von über einem Pixel ausgehen. Auch daraus kann die schon oben getroffene Empfehlung abgeleitet werden, Referenzrahmen mit automatisch extrahierbaren Marker zu nutzen. Alternativ kann diese Größe auch durch unbekannte systematische Fehler in den Passpunktkoordinaten entstehen, die nur durch die Vermessung zusätzlicher unabhängiger Referenzobjekte überprüft werden können.

In einem anschließenden Schritt wurde für die identische Systemkonfiguration die Genauigkeit der dynamischen Kalibration überprüft. Die minimal erreichbare mittlere zweidimensionale Reprojektionsabweichung beträgt dabei 0.27px.

6. SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Dies besagt, dass die interne Konsistenz des Verfahrens bis auf ca. ein Viertel Pixel Abweichung gegeben ist. Diese Restabweichungen können durch die generelle Genauigkeit der verwendeten automatischen Markerzentrumsbestimmung oder durch systematische Einflüsse hervorgerufen werden. Beispielsweise können sich durch die schlechte Ausleuchtung der Randzonen der Kamerabilder die helligkeitsbasierte Bestimmung der Markerzentren verschieben. Für die Systemgenauigkeit selbst kann aus diesen Größen keine Schlussfolgerung gezogen werden. Dazu müssen extern vermessene, nicht zur Kalibration verwendete Passpunkte herangezogen werden.

Daher wurden in einem weiteren Schritt Markerclustermessungen durchgeführt, deren Markerabstände genauer ermittelt werden konnten als die der Passpunktkoordinaten. Diese Messungen wurden sowohl für die Referenzrahmenkalibration als auch für die dynamische Kalibration durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die konstanten Markerabstände bei der dynamischen Kalibration mit einer geringeren Standardabweichung rekonstruiert werden konnten als bei der Kalibration mit dem Konstanzer Referenzrahmen. Der bei beiden Varianten entstandene systematische Fehler ist zu vernachlässigen.

Ob diese Messung die generell erreichbare Messgenauigkeit des Systems valide bestimmt, kann nur durch eine externe Referenzmessung bestimmt werden. Dazu wurde das entwickelte System gleichzeitig mit einem kommerziellen System der Firma VICON¹ betrieben, das aufgrund der geringen Messunsicherheit als Referenzsystem genutzt werden konnte. Mit dieser Konfiguration war es möglich, mit beiden Systemen exakt die gleichen retroreflektierenden Marker aufzuzeichnen und die Abweichungen der ermittelten Trajektorien zu bestimmen. Dabei ergaben sich Unterschiede in den Trajektorien von maximal 4.932 mm, wobei sich der Unterschied aus einem systematischen Offset von 0.073 mm und einem variablen Anteil mit einer Standardabweichung von 1.486 mm zusammensetzt (Abschnitt 5.3).

¹am Institut für Sportwissenschaft der Universität Bern



Abb. 6.1: Jeweils drei Kameras mit Zubehör können komfortabel von einer Person transportiert werden und sind dadurch flexibel einsetzbar.

Die Hauptergebnisse der Arbeit sollen im Folgenden nochmals stichpunktartig aufgelistet werden.

- Theoretische Aufarbeitung der Messunsicherheitsbestimmung
- Ableitung der Zusammenhänge von Kameraeigenschaften, Kameramodellierung und Bildmessung
- Aufarbeitung von Methoden der vermittelnden Ausgleichung im Zusammenhang mit der Parameteridentifikation von Kameramodellen
- Implementierung einer Simulationsumgebung zur Analyse von auftretenden Ungenauigkeiten, die auch zur Prädiktion von erreichbaren Unsicherheiten bei gegebenen Systemkonfigurationen genutzt werden kann.
- Implementierung verschiedener hardware-unabhängiger Kalibrations- und Rekonstruktionsalgorithmen
- Implementierung eines projektbasierten graphischen User-Interfaces zur Verwaltung der Videodatensätze und zur Ansteuerung der Kalibrations- und Rekonstruktionsverfahren
- Entwicklung eines portablen, flexibel einsetzbaren Highspeedkamarasystems (Abb. 6.1)
- Hardwaretests für die in Konstanz vorhandenen Kameras
- Unsicherheitsbetrachtung für die Konstanzer Systemanordnung
- Validierungsmessung anhand eines Vergleichs mit dem Berner VICON-System

6.2 Diskussion

Die der Arbeit zugrundeliegende Forschungsfrage wurde in Abschnitt 2.5 folgendermassen formuliert:

Welche methodischen Änderungen ermöglichen zum einen eine Reduktion, zum anderen eine (automatisierte) Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM für die dreidimensionale Erfassung menschlicher Bewegung mit Consumer-Kameras?

Vergleicht man die sich daraus ableitenden Ziele mit den berichteten Ergebnissen, so kann man folgende Schlüsse ziehen: Es konnten erfolgreich Methoden zur Reduktion der Messunsicherheit bzw. der Rekonstruktions- resp. Reprojektionsabweichungen identifiziert und implementiert werden. Diese sind auf unterschiedlichen Ebenen des Messprozesses angesiedelt und berücksichtigen teilweise speziell durch die Anwendung von Consumer-Kameras entstehende Fehlerquellen. Zum anderen konnten mit der Anpassung und Anwendung der dynamischen Kalibrationsmethode nach Svoboda u. a. (2005) die Probleme der Kalibration größerer Messvolumen mit der Referenzrahmenkalibration umgangen werden. Mit der dynamischen Kalibration können zudem auch Kameras mit nur teilweise oder gar nicht überlappenden Sichtfelder kalibriert werden, was diese Methode sehr interessant für eher ungewöhnliche Messvolumen, z. B. für die Erfassung von Sprintern machen könnte. Zudem konnte eine Methode nutzbar gemacht werden, die im Vergleich zur Referenzrahmenkalibration genauere Kalibrationsresultate liefern kann. Darüber hinaus werden für die ermittelten extrinsischen und intrinsischen Kameraparameter Unsicherheitsintervalle angegeben, die bei einer mehrstufigen Betrachtung des Messprozesses in die Unsicherheitsbetrachtung der Bewegungserfassungsphase einfließen können.

Die entwickelte Simulationsumgebung bietet die Möglichkeit, bereits vor einer ersten Pilotmessung auf Basis angenommener Kameraeigenschaften und Bewegungsgrößen eine ideale Systemkonfiguration zu bestimmen. Damit kann viel Zeit bei der Pilotierung neuer Systemkonfigurationen gespart und gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit einer hohen Datenqualität bei der eigentlichen Bewegungserfassung vergrößert werden.

Die durchgeführten Hardwaretests an der Kamera und der realen Systemkonfiguration sind sicherlich in erster Linie für die Anwendung im Konstanzer Labor relevant. Dabei muss einschränkend erwähnt werden, dass manche verwendeten Messmittel nur aus Mangel an Alternativen gewählt wurden. Mit einem gut ausgestatteten Messlabor hätte der Aufwand für manche Tests nur einen Bruchteil des so notwendigen Zeitaufwandes betragen. Trotzdem konnten auch mit diesen Tests im Hinblick auf die Systementwicklung ausreichend reliable Ergebnisse generiert werden.

Darüber hinaus konnten jedoch aus diesen speziell für die Konstanzer Systemkonfiguration durchgeführten Tests generelle Aussagen im Hinblick auf die implementierten Methoden abgeleitet werden, die auch unabhängig von den verwendeten Kameras gelten. So konnte die generelle Funktionsweise der automatischen Markerextraktionsmethode, des 2D-Trackings sowie der Synchronisierung und Neuabtastung der erhaltenen Trajektorien bestätigt werden. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die implementierten Rekonstruktionsverfahren stabil und ohne Fehlrekonstruktionen bei der Verwendung von minimal drei Kameras funktionieren. Diese Aussage hat allerdings nur eingeschränkten Gültigkeitsbereich, da weder Tests mit mehr als vier Kameras noch Tests mit mehr als sieben Markern durchgeführt wurden. Dort sind möglicherweise – vor allem im Hinblick auf die Performanz der Algorithmen – noch Anpassungen notwendig.

Vergleicht man die zweite Teilfragestellung der Forschungsfrage mit den Ergebnissen, so zeigt sich ein etwas anderes Bild: Die theoretische Herleitung der notwendigen Messunsicherheitsbestimmungen für die Prozessstufen der Bewegungserfassung konnte erfolgreich durchgeführt werden. Auch der Transfer, dass die Bündelausgleichsmethode bei Berücksichtigung des stochastischen Modells bereits die im GUM postulierte Fehlerfortpflanzungsmethode enthält, konnte abgeleitet werden. Im Anschluss wurden zudem die für die implementierten Systemvarianten unsicherheitsrelevanten Prozessschritte und ihre Behandlung im Bezug auf die Unsicherheitsfortpflanzung formuliert. Der dafür notwendige selbstkalibrierende Bündelblockausgleich unter Berücksichtigung des stochastischen Modells konnte jedoch nicht so implementiert werden, dass er stabile und reliable Ergebnisse liefert. Dementsprechend wurde das anvisierte Ziel einer vollautomatischen Messunsicherheitsbestimmung nicht vollends erreicht. Durch die schrittweise Betrachtung der einzelnen Phasen konnten jedoch für die Kalibrationsphase Unsicherheitsmaße in Form von Rekonstruktions- und Reprojektionsabweichungen bestimmt werden. Für die Bewegungserfassungsphase selbst dienen diese bei einer nicht überbestimmten Rekonstruktion zur Unsicherheitsbestimmung der rekonstruierten Koordinaten. Für die überbestimmte Rekonstruktion und die Anwendung des Bündelblockausgleichs zur abschließenden Optimierung über alle Parameter werden diese Verteilungen in der aktuellen Implementierung allerdings nicht berücksichtigt. Somit kann die zweite Teilfragestellung nur als teilweise beantwortet gelten, da die stabile Implementierung und die letztendliche Überprüfung der Methodik nicht durchgeführt werden konnten.

Rückblickend stellte sich die gesamte Entwicklung eines Bewegungserfassungserfassungssystems als ein sehr breites Feld für eine Abhandlung im Rahmen einer Dissertation dar. Daher konnten viele Bereiche nicht auf die Tiefe gebracht werden, die sich der Autor ursprünglich gewünscht hatte. Generell muss zudem erwähnt werden, dass die vorliegende Arbeit nicht den Anspruch hat, neue Verfahren auf dem Gebiet der Photogrammetrie zu entwickeln. Es sollten

lediglich die dort bereits bestehenden Methoden für die Bewegungserfassung im sport-/bewegungswissenschaftlichen Kontext nutzbar gemacht werden, um in Verbindung mit der technologischen Weiterentwicklung und Leistungssteigerung der Kameras eine – besonders im Sinne der Anschaffungskosten und der ökonomischen Durchführung – vorteilhafte Methodenkette zu erzeugen.

Auch wenn die spezifischen Systeme zur Bewegungserfassung mittlerweile immer bessere Module für die Outdoor-Erfassung bieten, sieht der Autor weiterhin in einer einfachen Hardware in Kombination mit einer elaborierten Software einen vielversprechenden und v.a. kostengünstigen Weg, um die Bewegungserfassung – und somit die quantitative Analyse menschlicher Bewegung – noch stärker in die Wissenschaft und die Praxis einbinden zu können. Schon alleine aufgrund der wesentlich geringeren Kameraauflösungen werden damit nie die Genauigkeiten erreicht werden können, die aktuelle Laborsysteme bieten. Wenn allerdings die Messunsicherheit solcher Systeme bekannt ist, bietet sich damit ein für viele Bereiche adäquates technologisches Mittel, sei es zur Feedbackgabe oder zur (biomechanischen) Bewegungserfassung auch in Umgebungen in denen ein kommerzielles Bewegungserfassungssystem bis heute nicht sinnvoll einsetzbar wäre.

6.3 Ausblick

Wie bereits in der Diskussion erwähnt, konnte die komplette Unsicherheitsfortpflanzung über alle Messprozesse und Einzelschritte nicht im Rahmen der Arbeit umgesetzt werden. Ein im selbstkalibrierenden Bündelblockausgleich integriertes stochastisches Modell mit der Möglichkeit, die Eingangsgrößen mit unterschiedlichen Unsicherheiten zu versehen und damit ihren Einfluss auf das ermittelte Ergebnis zu gewichten, wäre die Idealvariante zur Messunsicherheitsbestimmung. Dies umzusetzen, bleibt formuliertes Ziel über die Fertigstellung dieser Arbeit hinaus und wird bereits unter Verwendung von Consumer-Kameras, die zusätzliche Funkfernbedienungsfunktionen bei maximal 240 Bildern pro Sekunde bieten, am Institut für Sportwissenschaft der Universität Bern weiterentwickelt. Dabei bietet es sich zudem an neuere Entwicklungen aus der Photogrammetrie zu verfolgen, welche die zentralprojektiven Gleichungen direkt mit unsicherheitsbehafteten Größen zu lösen versuchen (z. B. SUGR: Statistically Uncertain Geometric Reasoning, vgl. Schneider, Schindler, Labe und Förstner, 2012).

Darüber hinaus sind während der Bearbeitung noch weitere offene Themenbereiche im Rahmen der Bewegungserfassung mit Consumer-Kameras identifiziert worden, die eine ganze Reihe an Entwicklungs- und Forschungsrichtungen öffnen und im Folgenden stichpunktartig beschrieben werden sollen:

- Integration einer Unsicherheitsellipse für die jeweiligen Positionen in *DigitizeMe* bei der manuellen Auswertung der Videodaten: Diese kann nach dem Anklicken des jeweiligen Körperpunktes durch Bewegen der Computermaus und nur einen weiteren Mausklick eingegeben werden und ermöglicht schon mit nur einem Rater eine Abschätzung der entstehenden Messunsicherheiten.
- Integration eines halbautomatischen Trackings für Farbmarker in *DigitizeMe*
- Optimierung der Bildverarbeitungs- und Trackingalgorithmen: Diese verbrauchen aktuell sehr viel Ressourcen und können im Hinblick auf Schnelligkeit und Zuverlässigkeit noch weiter optimiert werden. Dabei bieten sich vor allem Kalman-Filter-basierte Verfahren an (vgl. Abschnitt 4.2.4).
- Ausnutzen zusätzlicher Zwangsbedingungen: durch die beim 2D-Tracking ermittelten Kurven könnten nicht nur punktbasierte Kalibrationsalgorithmen, sondern kurvenbasierte Algorithmen verwendet werden. Diese berücksichtigen durch die Kurven entstehende weitere Zwangsbedingungen und können damit eventuell eine noch schnellere und stabilere Kalibration ermöglichen (vgl. z. B. Fabbri, 2010; Kaminski, Fryers, Shashua & Teicher, 2001; McKinnon, 2006).
- Weiterentwicklung der Messvolumenberechnung zu einer Optimierungsmethode für das verwendete Kamerasetup auf Basis zu erreichender Unsicherheiten
- Test der entwickelten Algorithmen mit mehr als vier Kameras: zwar sollte die Systemgenauigkeit mit zunehmender Kameraanzahl besser werden, die benötigten Ressourcen und der Rechenaufwand steigen jedoch. Daher müssen hier hauptsächlich Performanzaspekte betrachtet werden und eventuell weitere Optimierungen der Algorithmen erfolgen.
- Kombination der Messmethode mit inertialen Messsystemen zur weiteren Reduktion der Unsicherheiten
- Erweiterung der Unsicherheitsfortpflanzung nach GUM zur Unsicherheitsbetrachtung der Bewegungen des Menschmodells

Dabei zeigt sich an der Länge der Liste, dass sich beim Versuch eine Frage zu beantworten, eine Türe zu einer ganzen Reihe neuer Fragen öffnet. (Nicht nur) diese lassen das Leben spannend und unsicher bleiben, auch ohne dass dafür eine quantitative Angabe erforderlich oder möglich wäre. Schauen wir nach vorne und freuen uns darauf.

Literatur

- Abdel-Aziz, Y. I. & Karara, H. M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In o.V. (Hrsg.), *Papers from the 1971 ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry* (S. 1–18). Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Allard, P., Stokes, I. & Blanche, J. (1995). *Three-dimensional analysis of human movement*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Andersen, C. R. (2009). Determination of rigid body registration marker error from edge error. *Journal of Biomechanics*, 42(7), 949–951.
- Baca, A. (1997). Spatial reconstruction of marker trajectories from high-speed video image sequences. *Medical Engineering & Physics*, 19(4), 367–374.
- Baker, S., Bennett, E., Kang, S. & Szeliski, R. (2010). Removing rolling shutter wobble. In o.V. (Hrsg.), *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.
- Baumann, E. (2010). Das Fotobuch. Zugriff 9. Februar 2010, unter <http://www.elmar-baumann.de/fotografie/>
- Begon, M., Colloud, F., Fohanno, V., Bahuaud, P. & Monnet, T. (2009). Computation of the 3D kinematics in a global frame over a 40m-long pathway using a rolling motion analysis system. *Journal of Biomechanics*, 42(16), 2649–2653.
- Beutelspacher, A. & Rosenbaum, U. (2004). *Projektive Geometrie: Von den Grundlagen bis zu den Anwendungen*. Wiesbaden: Vieweg & Teubner.
- Bhimji, S., Deroy, A. R., Baskin, E. S. & Hillstrom, H. J. (2000). Static and dynamic accuracy of the VICON 370 3-D kinematic system. *Gait & Posture*, 11(2), 130.
- Blackman, S. (2004). Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 19(1), 5–18.
- Blackman, S. & Popoli, R. (1999). *Design and analysis of modern tracking systems*. Norwood, MA: Artech House.

- Bonnefoy, A., Pradon, D. & Chèze, L. (2005). Les systèmes d'analyse du mouvement: Techniques et principes, protocoles, sources d'erreurs et solutions. *ITBM-RBM News*, 26(6), 24–32.
- Bouguet, J.-Y. (1999). Camera calibration toolbox for matlab. Zugriff 14. Februar 2009, unter http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- Bradley, D., Atcheson, B., Ihrke, I. & Heidrich, W. (2009). Synchronization and rolling shutter compensation for consumer video camera arrays. In o.V. (Hrsg.), *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2009*. (S. 1–8). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.
- Briggs, S., Tyler, J. & Mullineaux, D. (2003). Communications to the 12th Commonwealth International Sport Conference, Part 1: Biomechanics. Accuracy of kinematic data calculated using SIMI motion. *Journal of Sport Sciences*, 21(4), 233–365.
- Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A. & Musiol, G. (2005). *Taschenbuch der Mathematik*. Frankfurt: Harri Deutsch.
- Brown, D. C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8), 855–866.
- Cao, X., Wu, L., Xiao, J., Foroosh, H., Zhu, J. & Li, X. (2010). Video synchronization and its application to object transfer. *Image and Vision Computing*, 28(1), 92–100.
- Cappozzo, A., della Croce, U., Leardini, A. & Chiari, L. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry: Part 1: Theoretical background. *Gait & Posture*, 21(2), 186–196.
- Carceroni, R. L., Padua, F. L. C., Santos, G. A. M. R. & Kutulakos, K. N. (2004). Linear sequence-to-sequence alignment. In o.V. (Hrsg.), *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'04)* (Bd. 1, S. 746–753). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.
- Casio Computer Co. Ltd. (2008). Casio digital camera EX-F1 user's guide. Zugriff 2. November 2013, unter http://support.casio.com/pdf/001/EXF1_MF_FD_110808_E.pdf
- Cerveri, P., Pedotti, A. & Ferrigno, G. (2005). Kinematical models to reduce the effect of skin artifacts on marker-based human motion estimation. *Journal of Biomechanics*, 38(11), 2228–2236.
- Christopher, G., Yoon, S. & Kwon, Y. (2008). Accuracy of sequential sub-field synchronization of multiple digital camcorders through numerical optimization. *Sports Biomechanics*, 7(2), 288–295.
- Chun, J.-B., Jung, H. & Kyung, C.-M. (2008). Suppressing rolling-shutter distortion of CMOS image sensors by motion vector detection. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 54(4), 1479–1487.

- Clarke, T. A. & Fryer, J. G. (1998). The development of camera calibration methods and models. *The Photogrammetric Record*, 16(91), 51–66.
- Conrady, A. E. (1919). Decentered lens systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 79, 384–390.
- Corazza, S., Mündermann, L., Gambaretto, E., Ferrigno, G. & Andriacchi, T. (2010). Markerless motion capture through visual hull, articulated ICP and subject specific model generation. *International Journal of Computer Vision*, 87(1), 156–169.
- Crocker, J. & Grier, D. (1996). Methods of digital video microscopy for colloidal studies. *Journal of Colloid and Interface Science*, 179(1), 298–310.
- Dapena, J. (2009). The rolling shutters of CMOS camcorders interfere with biomechanical motion analysis calculations: problems and solutions. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(5), 28–29.
- de Barros, R., Russomanno, T., Brenzikofer, R. & Figueroa, P. (2006). A method to synchronise video cameras using the audio band. *Journal of Biomechanics*, 39(4), 776–780.
- de Bièvre, P. (1997). Measurement results without statements of reliability (uncertainty) should not be taken seriously. *Accreditation and Quality Assurance*, 2, 269.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1995a). *DIN1319-1: Grundlagen der Messtechnik*. Berlin: Beuth.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1995b). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Deutsche Übersetzung: Leitfaden für die Angabe der Unsicherheit beim Messen)*. Berlin: Beuth.
- Diekmann, A. (2004). *Empirische Sozialforschung. Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. Hamburg: Rowohlt.
- Digital Imaging Websites Association. (2010). Diwa Test Guide. Zugriff 8. Januar 2010, unter <http://www.diwa-awards.net/wip4/test-guide>
- Donati, M., Camomilla, V., Vannozzi, G. & Cappozzo, A. (2007). Enhanced anatomical calibration in human movement analysis. *Gait & Posture*, 26(2), 179–185.
- Donati, M., Camomilla, V., Vannozzi, G. & Cappozzo, A. (2008). Anatomical frame identification and reconstruction for repeatable lower limb joint kinematics estimates. *Journal of Biomechanics*, 41(10), 2219–2226.
- Duprey, S., Cheze, L. & Dumas, R. (2010). Influence of joint constraints on lower limb kinematics estimation from skin markers using global optimization. *Journal of Biomechanics*, 43(14), 2858–2862.
- DxO Labs. (2011). DxOMark measurements for lenses and camera sensors. Zugriff 20. Mai 2011, unter <http://www.dxomark.com/About/In-depth-measurements/Measurements/Distortion>

- Ehara, Y., Fujimoto, H., Miyazaki, S., Mochimaru, M., Tanaka, S. & Yamamoto, S. (1997). Comparison of the performance of 3D camera systems II. *Gait & Posture*, 5(3), 251–255.
- Ehara, Y., Fujimoto, H., Miyazaki, S., Tanaka, S. & Yamamoto, S. (1995). Comparison of the performance of 3D camera systems. *Gait & Posture*, 3(3), 166–169.
- Ehrig, R. M., Heller, M. O., Kratzstein, S., Duda, G. N., Trepczynski, A. & Taylor, W. R. (2011). The SCoRE residual: a quality index to assess the accuracy of joint estimations. *Journal of Biomechanics*, 44(7), 1400–1404.
- Eisenhart, C. (1968). Expression of uncertainties of final results. *Science*, 160(3833), 1201–1204.
- Elster, C. (2007). Calculation of uncertainty in the presence of prior knowledge. *Metrologia*, 44(2), 111–116.
- Everaert, D. G., Spaepen, A. J., Wouters, M. J., Stappaerts, K. H. & Oostendorp, R. A. B. (1999). Measuring small linear displacements with a three-dimensional video motion analysis system: determining its accuracy and precision. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 80(9), 1082–1089.
- Ezhela, V. V. (2007). A multimeasurand ISO GUM supplement is urgent. *Data Science Journal*, 6, S676–S689.
- Fabrizi, R. (2010). *Multiview differential geometry in application to computer vision* (unveröffentlichte Doktorarbeit, Brown University, Providence, RI).
- Figuerola, P., Leite, N. & Barros, R. (2003). A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 72(2), 155–165.
- Fioretti, S., Germani, A. & Leo, T. (1985). Stereometry in very close-range stereophotogrammetry with non-metric cameras for human movement analysis. *Journal of Biomechanics*, 18(11), 831–842.
- Fischler, M. A. & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395.
- Fraser, C. S. & Al-Ajlouni, S. (2006). Zoom-dependent camera calibration in digital close-range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(9), 1017–1026.
- Fraser, C. S. & Shortis, M. R. (1995). Metric exploitation of still video imagery. *The Photogrammetric Record*, 15(85), 107–122.
- Gamage, S. & Lasenby, J. (2002). New least squares solutions for estimating the average centre of rotation and the axis of rotation. *Journal of Biomechanics*, 35(1), 87–93.
- Gennery, D. B. (2006). Generalized camera calibration including fish-eye lenses. *International Journal of Computer Vision*, 68(3), 239–266.

- Godding, R. (2002). Geometrische Kalibrierung und Orientierung digitaler Bildaufnahmesysteme. Zugriff 13. Juni 2011, unter www.falcon.de/falcon/pdf/de/aicon/geometric_calibration.pdf
- Göhring, D. (2002). Digitalkameratechnologien: Eine vergleichende Betrachtung CCD kontra CMOS. Zugriff 9. Februar 2010, unter http://www.drgoehring.de/uni/papers/CCD-CMOS_08122002.pdf
- González, J., Gámez, J., Sosa, J. & Brito, A. (2007). Comparing self-calibration methods for static cameras. In R. Moreno Díaz, F. Pichler & A. Quesada Arencibia (Hrsg.), *Computer aided systems theory - EUROCAST 2007* (S. 660–667). Berlin: Springer.
- Grün, A. (1994). Digital close range photogrammetry - progress through automation: Keynote Paper for ISPRS Commission V Symposium, Melbourne/Australia. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30(5), 122–135.
- Grün, A. (1997). Fundamentals of videogrammetry – a review. *Human Movement Science*, 16(2-3), 155–187.
- Guittney, V., Benosman, R. & Charbuillet, C. (2008). Synchronizing video sequences from temporal epipolar lines analysis. In J. Blanc-Talon, S. Bourennane, W. Philips, D. C. Popescu & P. Scheunders (Hrsg.), *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems* (S. 346–355). Berlin: Springer.
- Haferkorn, H. (2003). *Optik: Physikalisch-Technische Grundlagen und Anwendungen*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Hartley, R. & Zisserman, A. (2004). *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hässelbarth, W. (2004). *Forschungsbericht 266: BAM-Leitfaden zur Ermittlung von Messunsicherheiten bei quantitativen Prüfergebnissen*. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.
- Hatze, H. (1988). High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. *Journal of Biomechanics*, 21(7), 533–538.
- Heikkilä, J. (2000). Geometric camera calibration using circular control points. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(10), 1066–1077.
- Hennes, M. (2007). Konkurrierende Genauigkeitsmasse – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)*, 4, 136–146.
- Holzreiter, S., Kastner, J. & Wagner, P. (1993). Motion measurement with high-speed video. *Journal of Biomedical Engineering*, 15(2), 140–142.
- Hong, W., Wei, D. & Batur, A. (2010). Video stabilization and rolling shutter distortion reduction. In B. Law (Hrsg.), *2010 IEEE 17th International Conference*

- on Image Processing (ICIP 2010) Proceedings*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.
- Horn, B. K. P. (2000). Tsai's camera calibration method revisited. Zugriff 9. August 2010, unter http://people.csail.mit.edu/bkph/articles/Tsai_Revisited.pdf
- Hubel, P. M. & Bautsch, M. (2006). Resolution for color photography. In N. Sampat, J. M. DiCarlo & R. A. Martin (Hrsg.), *Electronic Imaging: Digital Photography II* (S. 60690M). San Jose, CA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).
- Jobbágy, A. & Furnée, E. (1994). Marker centre estimation algorithms in CCD camera-based motion analysis. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 32(1), 85–91.
- Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1. (2008). Evaluation of measurement data - guide to the expression of uncertainty in measurement.
- Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1. (2011). Evaluation of measurement data - supplement 2 to the guide to the expression of uncertainty in measurement - extension to any number of output quantities.
- Kaminski, J., Fryers, M., Shashua, A. & Teicher, M. (2001). Multiple view geometry of non-planar algebraic curves. In B. Werner (Hrsg.), *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) 2001* (Bd. 2, S. 181–186). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.
- Karlsson, D. & Tranberg, R. (1999). On skin movement artefact-resonant frequencies of skin markers attached to the leg. *Human Movement Science*, 18(5), 627–635.
- Kimothi, S. (2002). *The uncertainty of measurements. Physical and chemical metrology: Impact and analysis*. Milwaukee, WI: ASQ.
- Klein, P. J. & DeHaven, J. J. (1995). Accuracy of three-dimensional linear and angular estimates obtained with the ariel performance analysis system. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 76(2), 183–189.
- Kong, P. W., Luk, T. & Hong, Y. (2000). Difference between taekwondo roundhouse kick executed by the front and back leg – a biomechanical study. In Y. Hong, D. P. Johns & R. Sanders (Hrsg.), *Proceedings of the 18th International Symposium on Biomechanics in Sports (2000)*. Hong Kong: International Society of Biomechanics in Sports (ISBS).
- Kraus, K. (2004). *Photogrammetrie. Band 1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Kurzweil, P., Frenzel, B. & Gebhard, F. (2009). *Physik Formelsammlung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Kwon, Y. H. (1998). Kwon 3D - 3D DLT Method. Zugriff 8. Oktober 2009, unter <http://www.kwon3d.com/>

- Kwon, Y. H. (2005). A non-linear camera calibration algorithm: direct solution method. In Q. Wang (Hrsg.), *Scientific Proceedings of the XXIIIrd International Symposium on Biomechanics in Sports* (S. 142). Beijing: The China Institute of Sport Science.
- Laroche, E. & Kagami, S. (2009). Dynamical models for position measurement with global shutter and rolling shutter cameras. In N. Papanikolopoulo, S. Sugano, S. Chiaverini & M. Meng (Hrsg.), *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'09* (S. 5204–5209). Piscataway, NJ: IEEE Press.
- Leardini, A., Chiari, L., della Croce, U. & Cappozzo, A. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry: Part 3. Soft tissue artifact assessment and compensation. *Gait & Posture*, 21(2), 212–225.
- Lee, J. J. & Kim, G. (2007). Robust estimation of camera homography using fuzzy ransac. In *Proceedings of the 2007 International Conference on Computational Science and its Applications - Part I* (S. 992–1002). Berlin: Springer.
- Lei, C. & Yang, Y.-H. (2009). Efficient geometric, photometric, and temporal calibration of an array of unsynchronized video cameras. In B. Werner (Hrsg.), *Proceedings of the Canadian Conference on Robot Vision, CRV 2009* (S. 162–169). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.
- Litfin, G. (Hrsg.). (2005). *Technische Optik in der Praxis*. Berlin: Springer.
- Lucchetti, L., Cappozzo, A., Cappello, A. & della Croce, U. (1998). Skin movement artefact assessment and compensation in the estimation of knee-joint kinematics. *Journal of Biomechanics*, 31(11), 977–984.
- Luhmann, T. (Hrsg.). (2002). *Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis*. Heidelberg: Wichmann.
- Luhmann, T. (2010). *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. München: Verlag der bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck.
- Lüthi, T. (2010). *Objektivität, Reliabilität und Validität des Motion Capturing Systems Vicon MX des Instituts für Sportwissenschaft der Universität Bern* (Unveröffentlichte Masterarbeit, Universität Bern).
- Maas, H.-G. (1991). Digital photogrammetry for determination of tracer particle coordinates in turbulent flow research. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(12), 1593–1597.
- Maas, H.-G. (1999). Image sequence based automatic multi-camera system calibration techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(5), 352–359.
- Maas, H.-G. (2005). Werkzeuge und Anwendungen der photogrammetrischen 3D-Bewegungsanalyse. In T. Luhmann (Hrsg.), *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik — Beiträge der 5. Oldenburger 3D-Tage* (S. 2–12). Heidelberg: Wichmann.

- Magerand, L. & Bartoli, A. (2010). A generic rolling shutter camera model and its application to dynamical pose estimation. In N.N. (Hrsg.), *3DPVT'10 - Proceedings of the Fifth International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission* (o.S.). Paris: o.V.
- Maletsky, L. P., Sun, J. & Morton, N. A. (2007). Accuracy of an optical active-marker system to track the relative motion of rigid bodies. *Journal of Biomechanics*, 40(3), 682–685.
- Marzan, G. T. & Karara, H. M. (1975). A computer program for direct linear transformation solution of the collinearity condition, and some applications of it. In H. M. Karara (Hrsg.), *Proceedings of the symposium on close-range photogrammetric systems* (S. 420–476). Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- McKinnon, D. (2006). *The multiple view geometry of implicit curves and surfaces* (unveröffentlichte Doktorarbeit, University of Queensland, Brisbane).
- Menache, A. (2000). *Understanding motion capture for computer animation and video games*. San Diego, CA: Academic Press.
- Mitchell, H. (1995). Applications of digital photogrammetry to medical investigations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 50(3), 27–36.
- Mündermann, L., Corazza, S. & Andriacchi, T. (2006). The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 3(6), 1–11.
- Navratil, G. & Staudinger, M. (2006). Ausgleichsrechnung I: Die Anwendung statistischer Methoden in Vermessungswesen und GIS. Zugriff 1. März 2011, unter <ftp://ftp.geoinfo.tuwien.ac.at/navratil/Ausgleich1.pdf>
- Noguchi, M. & Kato, T. (2007). Geometric and timing calibration for unsynchronized cameras using trajectories of a moving marker. In o.V. (Hrsg.), *8th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, WACV 2007* (S. 20). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.
- Padua, F. L., Carceroni, R. L., Santos, G. A. & Kutulakos, K. N. (2010). Linear sequence-to-sequence alignment. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(2), 304–320.
- Papula, L. (1999). *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3: Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*. Braunschweig: Vieweg.
- Peters, A., Galna, B., Sangeux, M., Morris, M. & Baker, R. (2010). Quantification of soft tissue artifact in lower limb human motion analysis: A systematic review. *Gait & Posture*, 31(1), 1–8.

- Pollefeys, M., Koch, R. & van Gool, L. (1999). Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown intrinsic camera parameters. *International Journal of Computer Vision*, 32(1), 7–25.
- Pourcelot, P., Audigié, F., Degueurce, C., Geiger, D. & Denoix, J. M. (2000). A method to synchronise cameras using the direct linear transformation technique. *Journal of Biomechanics*, 33(12), 1751–1754.
- Puts, E. (2002). Leica M Objektive – Ihre Seele und ihre Geheimnisse. Zugriff 13. November 2010, unter http://www.leica-camera.de/assets/file/download.php?filename=file_104.pdf
- Raguse, K. & Heipke, C. (2005). Photogrammetrische Auswertung asynchroner Bildsequenzen. In T. Luhmann (Hrsg.), *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik — Beiträge der 5. Oldenburger 3D-Tage* (S. 14–21). Heidelberg: Wichmann.
- Raguse, K. & Heipke, C. (2006). Photogrammetric synchronization of image sequences. In H.-G. Maas & D. Schneider (Hrsg.), *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'* (S. 254–259). o.O.: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Raskar, R., Nii, H., deDecker, B., Hashimoto, Y., Summet, J., Moore, D., ... Bruns, E. (2007). Prakash: lighting aware motion capture using photosensing markers and multiplexed illuminators. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3), 36:1–36:11.
- Ray, S. (1999). *Scientific photography and applied imaging*. Oxford: Focal Press.
- Reid, D. B. (1978). An algorithm for tracking multiple targets. In S. W. Gully (Hrsg.), *1978 IEEE Conference on Decision and Control including the 17th Symposium on Adaptive Processes* (Bd. 17, S. 1202–1211). Piscataway, NJ: IEEE Control Systems Society.
- Remondino, F. & Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. In H.-G. Maas & D. Schneider (Hrsg.), *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'* (S. 266–272). o.O.: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Richards, J. (1999). The measurement of human motion: A comparison of commercially available systems. *Human Movement Science*, 18(5), 589–602.
- Ringer, M. & Lasenby, J. (2002). Multiple hypothesis tracking for automatic optical motion capture. In A. Heyden, G. Sparr, M. Nielsen & P. Johansen (Hrsg.), *Computer Vision - ECCV 2002. Proceedings* (S. 524–536). Berlin: Springer.
- Salvi, J., Armangué, X. & Batlle, J. (2002). A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern Recognition*, 35(7), 1617–1635.

- Schmidt, H. (2003). Was ist Genauigkeit? Zum Einfluss systematischer Abweichungen auf Mess- und Ausgleichungsergebnisse. *Vermessungswesen und Raumordnung*, 59, 173–184.
- Schneider, J., Schindler, F., Läbe, T. & Förstner, W. (2012). Bundle adjustment for multi-camera systems with points at infinity. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1(3), 75–80.
- Scholz, J. P. (1989). Reliability and validity of the watsmart three-dimensional optoelectric motion analysis system. *Physical Therapy*, 69(8), 57–67.
- Schwald, B. (2005). A tracking algorithm for rigid point-based marker models. In V. Skala (Hrsg.), *WSCG 2005 Poster proceedings* (S. 61–62). Plzen: University of West Bohemia.
- Schwarz, W. & Scheid, H. (2009). *Elemente der linearen Algebra und der Analysis*. Heidelberg: Spektrum.
- Shiratori, T., Park, H. S., Sigal, L., Sheikh, Y. & Hodgins, J. K. (2011). Motion capture from body-mounted cameras. *ACM Transactions on Graphics*, 30(4), 31:1–31:10.
- Shortis, M. R., Bellman, C., Robson, S. & Johnston, G. (2006). Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras. In H.-G. Maas & D. Schneider (Hrsg.), *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'* (S. 285–290). o.O.: International Archives of Photogrammetry und Remote Sensing.
- Shortis, M. R., Clarke, T. & Short, T. (1994). A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images. In S. F. El-Hakim (Hrsg.), *Videometrics III: Proceedings SPIE 2-4 November 1994, Boston, MA* (S. 239–249). Bellingham, WA: SPIE Press.
- Sigal, L. & Black, M. (2010). Guest editorial: state of the art in image- and video-based human pose and motion estimation. *International Journal of Computer Vision*, 87(1), 1–3.
- Sim, J. & Arnell, P. (1993). Measurement validity in physical therapy research. *Physical Therapy*, 73(2), 102–110.
- Simi Reality Motion Systems GmbH. (2013). Release of Simi Aktisys 1.3. Zugriff 20. Juni 2013, unter http://www.simi.com/uploads/media/Aktisys_1_3_en_04.pdf
- Smith, W. J. (2007). *Modern optical engineering: the design of optical systems*. New York, NY: McGraw-Hill Professional.
- Stagni, R., Fantozzi, S., Cappello, A. & Leardini, A. (2005). Quantification of soft tissue artefact in motion analysis by combining 3D fluoroscopy and stereophotogrammetry: A study on two subjects. *Clinical Biomechanics*, 20(3), 320–329.
- Steinhoff, S. & Wagner, P. (2010). Der Verschluss – Steuerung der Belichtung. Zugriff 6. August 2010, unter <http://www.scandig.info/Verschluss.html>

- Svoboda, T., Martinec, D. & Pajdla, T. (2005). A convenient multi-camera self-calibration for virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(4), 407–422.
- Thacker, B., Doebling, S., Hemez, F., Anderson, M., Pepin, J. & Rodriguez, E. (2004). *Concepts of model verification and validation* (Forschungsbericht Nr. LA-14167). Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory.
- Thöniss, T. (2006). Objektive in der industriellen Bildverarbeitung. Zugriff 12. September 2010, unter http://www.winlens.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Technical_papers/Objektive_in_der_industriellen_Bildverarbeitung.pdf
- Triggs, B. (1997). Linear projective reconstruction from matching tensors. *Journal of Image and Vision Computing*, 15(8), 617–626.
- Trioptics GmbH. (2011). MTF Modulationsübertragungsfunktion. Zugriff 6. März 2011, unter <http://www.trioptics.com/de/knowledgebase/mtf.php>
- Tsai, R. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(4), 323–344.
- Uematsu, Y. & Saito, H. (2007). Improvement of accuracy for 2d marker-based tracking using particle filter. In S. Kawada (Hrsg.), *Proceedings of the 17th International Conference on Artificial Reality and Telexistence* (S. 183–189). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.
- Velipasalar, S. & Wolf, W. H. (2008). Frame-level temporal calibration of video sequences from unsynchronized cameras. *Machine Vision and Applications*, 19(5-6), 395–409.
- Vieten, M. (2004). *Virtual biomechanics and its physics* (Habilitationsschrift, Universität Konstanz).
- Walker, B. H. (1998). *Optical engineering fundamentals*. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press.
- Weik, S., Wingbermühle, J. & Niem, W. (2000). Creation of flexible anthropomorphic models for 3d videoconferencing using shape from silhouettes. *Journal of Visualization and Computer Animation*, 11(3), 145–154.
- Welford, W. (1986). *Aberrations of optical systems*. Bristol: IOP Publishing.
- West, G. A. W. & Clarke, T. A. (1990). A survey and examination of subpixel measurement techniques. In A. Grün & E. Baltsavias (Hrsg.), *Close-range photogrammetry meets machine vision* (S. 456–463). Bellingham, WA: SPIE Press.
- Willson, R. (1994). *Modeling and calibration of automated zoom lenses* (Unveröffentlichte Doktorarbeit, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA).
- Windolf, M., Götzen, N. & Morlock, M. (2008). Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems – exemplified on the Vicon-460 system. *Journal of Biomechanics*, 41(12), 2776–2780.

LITERATUR

- Wing, A. & Beek, P. (2004). Motion analysis: A joint centenary. *Human Movement Science*, 23(5), III–IV.
- Yeadon, M. & King, M. A. (1999). A method for synchronising digitised video data. *Journal of Biomechanics*, 32(9), 983–986.
- Zelman, I., Galun, M., Akselrod-Ballin, A., Yekutieli, Y., Hochner, B. & Flash, T. (2009). Nearly automatic motion capture system for tracking octopus arm movements in 3D space. *Journal of Neuroscience Methods*, 182(1), 97–109.

Tabellenverzeichnis

2.1	Literaturübersicht zur Quantifizierung von Präzision und Richtigkeit in der Bewegungserfassung (modifiziert und erweitert nach Lüthi, 2010)	26
3.1	Die Hardwarekomponenten, ihre Funktion und dabei v.a. bei digitalen Consumer-Kameras entstehende Abweichungen	82
3.2	Funktionale Kameramodelle, Abbildungsverhalten und Parameteridentifikationsmethoden (Bündelblockausgleich (BA), Verzeichnungs-korrektur (VZ))	82
3.3	Messunsicherheitsabschätzung	84
4.1	Mögliche Bildraten und resultierende Sensorauflösung der Casio Exilim Pro EX-F1	87
4.2	Je nach Systemvariante und Prozessstufe unterscheiden sich die Eingangsgrößen, Verteilungen und Messmodelle. Hier werden die relevanten Größen für die DLT-Verfahren dargestellt.	142
4.3	Je nach Systemvariante und Prozessstufe unterscheiden sich die Eingangsgrößen, Verteilungen und Messmodelle. Hier werden die relevanten Größen für die Synchronisierung der zweidimensionalen Trajektorien und für die dynamische Kalibration dargestellt.	143
4.4	Je nach Systemvariante und Prozessstufe unterscheiden sich die Eingangsgrößen, Verteilungen und Messmodelle. Hier werden die relevanten Größen für die Rekonstruktion mit linearen Verfahren und dem Bündelausgleich dargestellt.	144
5.1	Stufen der simulierten zufälligen Abweichungen von Passpunkten und der Digitalisierabweichungen für die K- und NK-Passpunkte und die Stabendpunkte für die Simulation der Rekonstruktionsabweichungen	146

5.2	Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse zur Aufklärung des Einflusses einzelner Faktoren auf die Rekonstruktionsabweichungen. Die Faktoren sind die Passpunktabweichungen („Passpunkt“), Bildpunktabweichungen bei der Kalibration („Bildpunkt CAL“) und Bildpunktabweichungen bei der Rekonstruktion („Bildpunkt REK“).	152
5.3	Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse für die Einflussfaktoren auf die rekonstruierte Stablänge	152
5.4	Die Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse zeigen keinen Einfluss des Bündelblockausgleichs bei rein systematischen Messfehlern.	155
5.5	Rekonstruktionsabweichungen von zur Kalibration verwendeten Passpunkten bei der Referenzrahmenkalibration	157
5.6	Rekonstruktionsabweichungen von nicht zur Kalibration verwendeten Passpunkten bei der Referenzrahmenkalibration	157
5.7	Rekonstruktionsabweichungen einer Referenzrahmenkalibration bei Nutzung aller Passpunkte als ein Maß für die verbleibenden systematischen Abweichungen und nicht modellierten Systemeigenschaften (Details im Text)	158
5.8	Mit der DLT-Methode berechnete Kamerazentren und Orientierungen: Links sind die Resultate mit Bündelblockausgleich und Verzeichnungskorrektur, rechts die Ergebnisse der linearen Methode dargestellt.	159
5.9	Mittelwerte und Standardabweichungen von je zehn mit dem gleichen Datensatz berechneten dynamischen Kalibrationen. Dabei wurden zusätzlich die Faktoren Bündelblockausgleich (BA) und Rolling-Shutter-Korrektur (RS) variiert.	165
5.10	Intrinsische Kameraparameter: Mittelwerte und Standardabweichungen innerhalb (<i>SD</i> inn.) von je zehn mit dem gleichen Datensatz berechneten dynamischen Kalibrationen. Dabei wurden zusätzlich die Faktoren Bündelblockausgleich (BA) und Rolling-Shutter-Korrektur (RS) variiert und die Standardabweichung bestimmt (<i>SD</i> zw.).	166
5.11	2D-Reprojektionsfehler: Mittelwerte und Standardabweichungen von je zehn mit dem gleichen Datensatz berechneten dynamischen Kalibrationen. Dabei wurden zusätzlich die Faktoren Bündelblockausgleich (BA) und Rolling-Shutter-Korrektur (RS) variiert.	167
5.12	Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse der Einflussfaktoren auf die Reprojektionsabweichungen der dynamischen Kalibration	168

5.13	Markerclustermessung: Rekonstruierte Markerabstände für die zwei implementierten Kalibrationsalgorithmen mit anschließendem Bündelblockausgleich und Vergleich zu den mit VICON ermittelten statischen Referenzwerten. Beide Methoden können die Markerabstände mit einer Abweichung von weniger als 1 mm zur Referenz rekonstruieren. Bei höheren Objektgeschwindigkeiten nimmt die Standardabweichung trotz Rolling-Shutter-Korrektur zu.	170
5.14	Absolute Abweichungen zwischen den mit dem Konstanzer System und dem VICON-System rekonstruierten Positionen des Kalibrationsstabs und der zur Bestimmung des Unterarmflexionswinkels verwendeten Marker	171
A.1	Parameterkonfiguration, Funktion und Werte der Parameter für die dynamische Kalibration	216

Abbildungsverzeichnis

1.1	Nachweis der Flugphase (Teilbild 2 und 3) im Pferdegalopp durch Sequenzaufnahmen (Muybridge, 1878, http://www.fennet.de/walter.preiss/bilder/muybridge.jpg).	1
1.2	Mareys chronophotographische Studien zur Bewegung des Menschen (Etienne-Jules Marey, Étude chronophotographique de la locomotion humaine, 1886, http://www.understandingduchamp.com/author/marey/index.html) . .	2
2.1	Weinberger Speedcam 500 Highspeed-Kamerasystem der Universität Konstanz (http://www.weinberger-service.com/d/speedcam.html) .	10
2.2	Aktive Infrarotmarker des Lukotronic-Systems der Universität Konstanz zur Bewegungserfassung der Phalange beim Klavierspiel (Riehle, 2009)	12
2.3	Passive, retroreflektierende Marker an den zu erfassenden Körperpunkten	15
2.4	Referenzrahmen an der Universität Konstanz	16
2.5	Prozessschritte der Bewegungserfassung	17
2.6	Charakterisierung der Messgenauigkeit anhand der Präzision (Streuung der einzelnen Messwerte um ihren Mittelwert) und der Richtigkeit, die eine (systematische) Abweichung des Mittelwertes vom wahren Wert darstellt. Die durch die Zielscheibenkreise zugewiesenen diskreten Messwerte erlauben zudem eine bildliche Darstellung der Auflösung des Messsystems (modifiziert nach Schmidt, 2003).	19
2.7	Fehlerarten und ihr Bezug zu den Gütekriterien eines Messsystems .	19
2.8	Prozess zur Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM (modifiziert nach Kimothi, 2002)	22

2.9	Für den zweidimensionalen Fall können aus in diesem Fall bivariaten Gaussverteilungen elliptische und rechteckige Konfidenzregionen gebildet werden. Mit den elliptischen Konfidenzregionen werden zusätzlich die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Dimensionen bei der Bildung der Vertrauensbereiche abgebildet (Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1, 2011).	26
2.10	Schematische Prozessschritte der Bewegungserfassung mit Unsicherheitsbetrachtung. Die gepunkteten Pfade stellen den Ablauf bei zeitlich getrennter Kalibration und Orientierung dar, die vollen Linien den der eigentlichen Bewegungserfassung.	32
3.1	Optische Abbildung (modifiziert nach Luhmann, 2010)	36
3.2	Prinzip des Zoomobjektivs: die Variation des Strahlengangs durch eine verschiebbare Streuungslinse ermöglicht die Anpassung des Abbildungsverhaltens vom Teleobjektiv (oben) bis zum Weitwinkelobjektiv (unten).	38
3.3	Optische Abbildung mit (Apertur-)Blende im Strahlengang (modifiziert nach Luhmann, 2010)	38
3.4	Schematische Darstellung einer Irisblende zur Regulierung des Lichtdurchlasses: die Größe der kreisförmigen Blendenöffnung kann durch die Position beweglicher Lamellen verändert werden (modifiziert nach http://www.sitecrea.de/Irisblende/blende1.html [10.08.2008]).	38
3.5	Durch die unterschiedliche Größe des Lichtkegels abhängig von der Blendenöffnung wird zusätzlich zur Auflösung und Helligkeit des abgebildeten Motivs die Schärfentiefe beeinflusst (oben: bei offener Blende kleine Schärfentiefe, unten: bei kleinerem Blendendurchmesser größere Schärfentiefe). Diese ist bestimmt durch den Abstand aus Nah- und Fernpunkt, welche die Punkte mit dem maximal erlaubten <i>circle-of-confusion</i> (CoC) auf der Bildebene darstellen (modifiziert nach http://www.dimagemaker.com/2007/01/15/depth-of-field-e-how-does-it-really-work/ [10.08.2008]).	39
3.6	Funktion eines Schlitzverschlusses (von links nach rechts): die zwei (dunkel- und hellgrau dargestellten) verzögert nacheinander startenden, sich gleich schnell bewegenden Jalousien ermöglichen eine konstante Belichtungszeit der einzelnen Sensorteilflächen abhängig von der Startverzögerung der zweiten Jalousie und ihrer Geschwindigkeit.	40
3.7	Rolling-Shutter-Effekt bei Aufnahme einer Zugvorbeifahrt: Verzerrung schnell bewegender Objekte durch zeitlich versetztes Belichten der einzelnen Sensorpixel (Zeitversatz von oben nach unten)	40

3.8	Aufbau und Farbschichten eines Farbfilms (modifiziert nach http://www.elmar-baumann.de/fotografie/fotobuch/node24.html [10.08.2008])	41
3.9	Bayer Pattern: Die Farbfilter (grün 50%, blau und rot je 25%) auf den einzelnen Sensorpixeln (grau) führen zu farbspezifischen Sensorpixeln einhergehend mit einer Reduktion der Bildauflösung (dargestellt anhand der farbigen Pfeile, modifiziert nach http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bayer_pattern_on_sensor_profile.svg [10.04.2010]).	42
3.10	Lochkameramodell	44
3.11	Interne Kameraparameter: Brennweite f (bei nicht quadratischen Sensorpixeln: α_x und α_y); Ursprung des Bildkoordinatensystems und Schnittpunkt der optischen Achse sind unterschiedlich.	46
3.12	Stehen die Achsen des Bildkoordinatensystems senkrecht zueinander, ist der Skew Parameter s Null (links); weicht der Achsenwinkel von 90° ab, ist der Skew ungleich Null (rechts).	46
3.13	Externe Kameraparameter: Das Kamerakoordinatensystem C ist im Bezug zum Weltkoordinatensystem mit der Rotationsmatrix R gedreht und um den Vektor t verschoben	47
3.14	Modelle der optischen Abbildung (modifiziert nach Thöniss, 2006)	49
3.15	Die Linse bricht eintreffendes Licht abhängig von seiner Wellenlänge (Dispersion). Die entstehende Positionsdifferenz der unterschiedlichen Schnittpunkte mit der optischen Achse wird Farblängsfehler Δl genannt. Tritt zusätzlich eine wellenlängenabhängige Veränderung des Abbildungsmaßstabes auf, erzeugt diese den Farbquerfehler Δq (modifiziert nach Luhmann, 2010 und Thöniss, 2006).	50
3.16	Die Abweichung eines Objektivs vom linsensymmetrischen Aufbau führen zu unterschiedlichen Eintritts- (EP) und Austrittspupillen (AP), und damit zu einer radialsymmetrischen Verzerrung der Bildpunkte, der sog. Verzeichnung $\Delta r'$ (modifiziert nach Luhmann, 2010).	51
3.17	Beugungsbild (Helligkeitsverteilung einer Punktquelle) für eine (a) ideale, beugungsbegrenzte und (b) durch eine reale, aberrationsbehaftete Abbildung (Thöniss, 2006)	52
3.18	Bestimmung der Modulation Transfer Function eines Objektivs durch die Abbildung von Streifenbildern (modifiziert nach http://www.trioptics.com/imagemaster/images/31.jpg [30.10.2010])	52
3.19	Die monochromatischen Schärfefehler: a sphärische Aberration, b Astigmatismus, c Koma (modifiziert nach http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/physik/18)	54

3.20	Die monochromatischen Lagefehler: a Bildfeldwölbung, b Verzeichnung: Gegenstand wird entweder nicht (orthoskopische Abbildung, 1), kissenförmig (Abbildungsmaßstab nimmt mit Entfernung zur optischen Achse ab, 2) oder tonnenförmig (Abbildungsmaßstab nimmt mit Entfernung zur optischen Achse zu, 3) verzeichnet (modifiziert nach http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/physik/18).	55
3.21	Durch die Wandbegrenzungen der vertieft im Sensor sitzenden Pixel wird mit zunehmendem Strahlenwinkel ein Teil der einfallenden Strahlen abgeblockt (links). Der dadurch entstehende Helligkeitsabfall zum Rand des Bildes hin wird als (Pixel-)Vignettierung bezeichnet (Thönniss, 2006). Passendes (Mitte) und zu geringes (rechts) Auflösungsvermögen des Objektivs im Vergleich zur Auflösung des verwendeten Bildsensors (modifiziert nach Digital Imaging Websites Association, 2010)	60
3.22	Prinzipskizze des Modellblockausgleichs: Die ursprünglich nicht identischen Verknüpfungspunkte der einzelnen Rekonstruktionen der Bildpaare werden in einem gemeinsamen Ausgleich auf identische Punkte abgebildet.	67
3.23	Prinzip des räumlichen Vorwärtsschnitts: Rekonstruktion des Weltpunktes X anhand des Schnittpunkts der Geraden von den (bekannten) Kamerazentren C_1 und C_2 aus durch die jeweiligen Bildpunkte x und x'	74
3.24	Trotz guter Werte bei der Kalibrationsgütebestimmung von SIMI Motion entstanden durch systematische Passpunktkoordinatenabweichungen große Fehler bei der Rekonstruktion, die von der Software nicht erkannt wurden. Hier veranschaulicht an der Reprojektion der rekonstruierten Markerkoordinaten auf eine Kameraperspektive mit den verwendeten retroreflektierenden Markern am Beispiel einer Tischtennisaufnahme.	78
4.1	Die Consumer-Kamera Casio Exilim Pro EX-F1 bietet eine Highspeed-Videofunktion	86
4.2	Die Software DxO Analyzer berechnet die geometrische Verzeichnung aus dem Verhältnis der Bildbreite zur maximalen Abweichung von der Punktlinie (modifiziert nach DxO Labs, 2011)	89
4.3	Geometrische Verzeichnung der Casio Exilim EX-F1	89
4.4	Chromatische Aberrationen der Casio Exilim PRO EX-F1	90
4.5	Abhängigkeit der erreichbaren Ortsfrequenz von der Brennweite und Blende unter Annahme einer Kontrasterhaltung von 50% in den Ecken des Bildes (MTF 50% Corner)	91

4.6	Abhängigkeit der Auflösungsleistung der einzelnen Farbkanäle von Brennweiten- und Blendeneinstellung bei einer Ortsfrequenz von einem Sechzehntel der Grenzfrequenz	92
4.7	Automatische Ermittlung der Kanten aller Rechteck-Ecken (links) und Extraktion der Kanten auf 0.1px genau (rechts)	93
4.8	Setup Repositioniergenauigkeitsmessung	94
4.9	Horizontale und vertikale Positionsabweichungen vom Mittelwert der 49 Messpositionen (Abszisse) aus 10 Aufnahmen (Ordinate) für alle Kameras: der Farbwert entspricht der Abweichung in Pixeln gemäß Legende.	95
4.10	Setup zur Bestimmung der Bildrate: Auslesezeitpunkt 00:02:01, links unten die Framenummer des Videobildes (36704 Frames)	97
4.11	Mittelwert und Standardabweichungen der ermittelten Bildrate	97
4.12	Draufsicht (links) und Frontalansicht (rechts) des Setups zum Test der Rolling-Shutter-Effekte	99
4.13	Bei unbewegtem Objekt sind die Winkel des Schachbrettmusters 90° (links). Bewegt sich das Objekt verzerren sie sich durch die Zeitverzögerung des Rolling-Shutters (Mitte und rechts).	100
4.14	Standbild aus einem Testvideo zur Rolling-Shutter-Faktor Bestimmung. Das Objekt bewegt sich von links nach rechts und führt zu Verzerrungen des Schachbrettmusters aufgrund der verzögerten Belichtung vertikaler Sensorreihen.	100
4.15	Messdaten aus den Rolling-Shutter-Tests mit angepasster Ausgleichsgeraden zur Bestimmung der Verzögerungszeit des Rolling-Shutters. Horizontal ist die gerichtete Horizontalgeschwindigkeit des Objektes angetragen, vertikal die entstehenden Abweichungen pro Pixel vertikalem Versatz.	101
4.16	Das entwickelte graphische Benutzerinterface erlaubt die projektorientierte Zuordnung der aufgezeichneten Videodateien zu den Kameras sowie die Auswahl aufnahmespezifischer Parameter. Es dient zudem als zentrales Interface zur Auswahl aller weiteren relevanten Funktionen im Rahmen der Bewegungserfassung (z. B. Kalibrierung, Markerextraktion, Details finden sich in den entsprechenden Abschnitten).	105
4.17	Benutzerinterface „DigitizeMe“ zur manuellen Identifikation von Körperpunkten am Beispiel einer Beachvolleyball Aufnahme: Rechts die relevanten Punkte des Körpermodells.	106
4.18	Hybrides Markerset aus Farbmarkern und retroreflektierenden Markern für eine Studie zum Klavierspielen (Riehle, 2012)	108
4.19	Markertypen (schematisch): retroreflektierender Kugelmarder (links), flächiger Kontrast- (Mitte) und Farbmarker (rechts)	108

4.20	Links: Ursprünglicher LED-Ringaufsatz zur Beleuchtung der retroreflektierenden Marker. Rechts: Bei gerichteter Beleuchtung und unempfindlicher, „unterbelichteter“ Kameraeinstellung werden lediglich die retroreflektierenden Marker deutlich abgebildet, Hintergrund und aufzunehmende Person sind kaum sichtbar. Dies erlaubt eine einfache Detektion der Marker. Am unteren Rand ist die nicht homogene Ausleuchtung des Sichtfeldes durch die LED-Ringe deutlich sichtbar.	109
4.21	Markerset (links) und Kalibrationsstab für die Kalibration nach Svoboda, Martinec und Pajdla (2005) (rechts)	110
4.22	Links: Einzelne LED-Marker und verkettetes Set. Rechts: Active Markerset in Anwendung bei der Bewegungserfassung eines Hammerwurfs (Riehle, 2012).	112
4.23	Abb. retroreflektierender Kugelmarder im HS300-Video der Kamera Casio Exilim EX-F1 (Ausschnitt): Diskretisierung der Sphären durch die Pixelauflösung (oben), Binäre Schwellenwertbildung liefert vom Hintergrund separierte BLOBs, deren Zentren anhand der Intensitätsverteilung genauer lokalisiert werden können (unten). Am rechten Bildrand stehen zwei Marker kurz vor der Überdeckung, die anhand der Exzentrizität des entstehenden, gemeinsamen BLOB ausgefiltert werden können.	113
4.24	Interpolation des entstehenden Markerbildes durch eine Gaußfunktion bei der Kalibrationsmethode nach Svoboda, Martinec und Pajdla (2005)	115
4.25	Vollautomatische Extraktion der Markerzentren durch die entwickelte Software am Beispiel einer Tischtennisaufnahme. Durch die Einschränkung der aktiven Region (ROI) wird die Reflektion der Tischtennisplatte nicht als BLOB identifiziert.	116
4.26	Darstellung des Markertrackingproblems: Es müssen die Zuordnungsvorschriften gefunden werden, welche die in Bild i und Bild $i+1$ vorhandenen Marker miteinander verknüpfen (schwarze Pfeile). Dabei können in Bild i verdeckte Marker in Bild $i+1$ hinzukommen und es können bereits zugeordnete Marker (temporär) verdeckt sein (Bild $i+2$), welche bei Rückkehr ins Bild der zugehörigen Trajektorie zugewiesen werden müssen (Bild $i+1$).	117
4.27	Matlab Interface zur Identifikation von Start- und Endzeitpunkten	123
4.28	Simulation der Konstanzer Laborsituation mit vier Kameras zum Test der Referenzrahmenkalibration mit unterschiedlichen DLT-Implementierungen. Simulierte Abweichungen auf unterschiedlichen Prozessstufen verursachen die dargestellten Rekonstruktionsabweichungen.	127

4.29	Rekonstruktion eines Stabes mit 300 mm Länge an zufälligen Positionen innerhalb des Messvolumens (Referenzrahmens) von Kamera 1 aus betrachtet	127
4.30	Angepasstes Kalibrierobjekt für die Maßstabsbestimmung und Orientierung des Laborkoordinatensystems zur Kalibration nach Svoboda, Martinec und Pajdla (2005)	129
4.31	Zur Selbstkalibration genutzte Kalibrierstabkoordinaten innerhalb des ursprünglichen Messvolumens des Referenzrahmens: Skalierungspunkte (grün), Laborkoordinatensystem (rot, grün, blau) und rekonstruierte Kamerapositionen und -orientierungen (blau), Einheit in Metern.	129
4.32	System-Validierungsmessung mit VICON: Die überlappenden Messvolumen erlaubten die zeitgleiche Aufzeichnung retroreflektierender Marker mit beiden Bewegungserfassungssystemen.	131
4.33	VICON Rekonstruktion der Kalibrierbewegung (links) und Rekonstruktion des Skalierungsmaßstabs zur Koordinatensystembestimmung (rechts). Durch die Übernahme der Koordinaten für die Skalierung des Konstanzer Systems können die aufgezeichneten Trajektorien miteinander verglichen werden.	131
4.34	Verwendete Markercluster zur Berechnung der Armposition und des Unterarmflexionswinkels und VICON-Rekonstruktion der Bewegung .	131
4.35	Der Prozess der Referenzrahmenkalibration	135
4.36	Geschätzte korrigierte Horizontalpositionen aus der Unsicherheitsberechnung nach GUM für die Rolling-Shutter-Korrektur bei Variation von Objektgeschwindigkeit und vertikaler Bildposition (obere Reihe). Abhängig von der Unsicherheit der Eingangsgrößen variiert die Unsicherheit der Ausgangsgrößen. In der unteren Reihe links wird eine Digitalisiergenauigkeit von 0.25px zugrunde gelegt, rechts eine für manuelle Auswertungen geschätzte Genauigkeit von 1.00px.	137
4.37	Der aus der beschriebenen Vorgehensweise entstehende schematische Prozess der dynamischen Kalibration	139
4.38	Für die Rekonstruktion dreidimensionaler Koordinaten mit dem Vorwärtsschnitt ergibt sich der dargestellte Prozess.	140
4.39	Wird ein Bündelblockausgleich genutzt, werden im letzten Schritt der Rekonstruktion auf Basis der zuvor ermittelten Schätzwerte der dreidimensionalen Punktkoordinaten eine für alle Punkte statisch optimale Rekonstruktion ermittelt. Durch das stochastische Modell des Ausgleichsverfahrens können dabei direkt die Unsicherheiten der Ausgangsgrößen bestimmt werden.	141

5.1	Auswirkungen zufälliger (normalverteilter) Abweichungen der Passpunktkoordinaten (PP), der Bildkoordinaten (BP) und des Einsatzes des Bündelblockausgleichs (BA) auf die Rekonstruktionsgenauigkeit zur Kalibration verwendeter Passpunkte [mm]	147
5.2	Auswirkungen zufälliger (normalverteilter) Abweichungen der Passpunktkoordinaten (PP), der Bildkoordinaten (BP) und des Einsatzes des Bündelblockausgleichs (BA) auf die Rekonstruktionsgenauigkeit nicht zur Kalibration verwendeter Passpunkte [mm]	148
5.3	Auswirkungen zufälliger (normalverteilter) Abweichungen der Passpunktkoordinaten (PP), der Bildkoordinaten (BP) und des Einsatzes des Bündelblockausgleichs (BA) auf die Rekonstruktionsgenauigkeit nicht zur Kalibration verwendeter Passpunkte bei vier Kameras [mm]	149
5.4	Die Multi-Vari-Charts zeigen (unter anderem) die Auswirkungen unterschiedlicher Digitalisierabweichungen auf die Rekonstruktionsgenauigkeit der Passpunktkoordinaten [mm]. Von oben nach unten sind die Rekonstruktionen von NK-Passpunkten mit allen Kameras, die Rekonstruktion von K-Passpunkten und von NK-Passpunkten mit Kamerapaaren dargestellt.	150
5.5	Die Multi-Vari-Charts zeigen den größeren Einfluss zufälliger Digitalisierabweichungen der Stabendpunkte im Vergleich zu den anderen variierten zufälligen Abweichungen bei der Rekonstruktion der Stablänge [mm]. Auch hier ist die Rekonstruktion mit vier Kameras (oben) wesentlich genauer als mit Kamerapaaren (unten).	153
5.6	Die Abweichungen [mm] hängen allerdings von der Länge des Objektes ab: je länger, desto stärker wirken sich die zufälligen Abweichungen der Passpunkte aus. Hier dargestellt am Vergleich eines 300, 900 und 1500 mm langen Stabes bei der Rekonstruktion mit Kamerapaaren.	154
5.7	Bei rein systematischen Fehlern, dargestellt durch die Maßstabsänderung des Referenzrahmens und die konstanten Offsets auf den Passpunktkoordinaten, kann der Bündelblockausgleich nicht zur Verbesserung der Rekonstruktionsgenauigkeit [mm] beitragen.	155
5.8	Boxplot der Rekonstruktionsabweichungen bei rein systematischen Fehlern ohne (links) und mit Bündelblockausgleich (rechts)	155
5.9	Die vier Kameraansichten der Kalibrationsbewegung. Die blauen Punkte wurden nach der finalen RANSAC-Prozedur zum Bündelblockausgleich genutzt, die roten Punkte wurden verworfen. Grün dargestellt sind verzeichnungskorrigierte Punkte.	161

5.10	Seitenansichten und Draufsicht der rekonstruierten Positionen des Kalibrationsmarkers (rot) und der Kamerapositionen und -orientierungen (blau). Zusätzlich wurden die digitalisierten Markerpunkte des Referenzrahmens rekonstruiert (grün). Alle Einheiten in [mm].	162
5.11	Das Ergebnis der dynamischen Kalibration liefert zudem eine detaillierte Übersicht zu den Verzeichnungs- und Kameraparametern. Hier exemplarisch die ermittelten Werte einer Kamera des Vier-Kamera-Setups mit den zugeordneten Unsicherheiten.	163
5.12	Im Rahmen der Kalibration wird zusätzlich das maximale Aufnahmevolumen berechnet und dargestellt. Durch die Navigationsmöglichkeit innerhalb der Matlab-Umgebung, können damit leicht nicht erfassbare, für die Bewegungserfassung jedoch notwendige Aufnahmebereiche gefunden werden, die im Anschluss mit zusätzlichen Kameras abgedeckt werden können. Alle Einheiten in [mm].	163
5.13	Die zweidimensionalen Reprojektionsabweichungen der Kameras des Vier-Kamera-Setups nach dem finalen Ausgleich. Ohne Rolling-Shutter-Korrektur konnten im Mittel 0.25px Abweichung erreicht werden.	164
5.14	VICON-Rekonstruktion an drei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten der Unterarmflexionsbewegung. Die Auswertung erfolgte über den kompletten Bewegungszyklus von Streckung (linkes Bild) über die Beugung (rechtes Bild) zur Streckung.	172
5.15	Vergleich des mit VICON rekonstruierten Winkelverlaufs der Unterarmflexion mit dem Winkelverlauf aus dem Konstanzer System: Die Abweichungen betragen im Mittel -0.105° bei einer Standardabweichung von 0.873°	172
6.1	Jeweils drei Kameras mit Zubehör können komfortabel von einer Person transportiert werden und sind dadurch flexibel einsetzbar.	179

Anhang

A.1 Lösung der Unsicherheitsfortpflanzung impliziter Messmodelle

Zur numerisch stabilen Lösung der Unsicherheitsfortpflanzung implizit vorliegender Messmodelle schlägt der GUM folgende Vorgehensweise vor (Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1, 2011):

- Cholesky-Faktorisierung von U_x nach der oberen Dreiecksmatrix R_x , so dass gilt $R_x^T R_x = U_x$
- Faktorisierung von C_x als das Produkt von $C_x = Q_x W_x$, nach der orthogonalen Matrix Q_x und der oberen Dreiecksmatrix W_x
- Faktorisierung von C_y als das Produkt von $C_y = L_y W_y$, nach der unteren Dreiecksmatrix L_y und der oberen Dreiecksmatrix W_y
- Lösen des Gleichungssystems $W_y^T M_1 = I$ für M_1
- Lösen des Gleichungssystems $L_y^T M_2 = M_1$ für M_2
- Aufstellen von $M_3 = Q_x^T M_2$
- Aufstellen von $K = W_x^T M_3$
- Aufstellen von $M = R_x K$
- Bildung der orthogonalen Dreiecksmatrix R aus M
- Bildung von U_y aus $R^T R$

A.2 Partielle Ableitungen der DLT-Gleichungen

Die DLT-Gleichungen lauten:

$$x_i = \frac{L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i + L_4}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1}$$
$$y_i = \frac{L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i + L_8}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1}$$

Die partiellen Ableitungen der ersten Teilgleichung nach den DLT-Parametern lauten:

$$\frac{\partial x_i}{\partial L_1} = \frac{X_i}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1}$$
$$\frac{\partial x_i}{\partial L_2} = \frac{Y_i}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1}$$
$$\frac{\partial x_i}{\partial L_3} = \frac{Z_i}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1}$$
$$\frac{\partial x_i}{\partial L_4} = \frac{1}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1}$$
$$\frac{\partial x_i}{\partial L_5} = 0$$
$$\frac{\partial x_i}{\partial L_6} = 0$$
$$\frac{\partial x_i}{\partial L_7} = 0$$
$$\frac{\partial x_i}{\partial L_8} = 0$$
$$\frac{\partial x_i}{\partial L_9} = -\frac{X_i(L_4 + L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2}$$
$$\frac{\partial x_i}{\partial L_{10}} = -\frac{Y_i(L_4 + L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2}$$
$$\frac{\partial x_i}{\partial L_{11}} = -\frac{Z_i(L_4 + L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2}$$

A.2. Partielle Ableitungen der DLT-Gleichungen

Die partiellen Ableitungen der zweiten Teilgleichung nach den DLT-Parametern lauten:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial y_i}{\partial L_1} &= 0 \\
 \frac{\partial y_i}{\partial L_2} &= 0 \\
 \frac{\partial y_i}{\partial L_3} &= 0 \\
 \frac{\partial y_i}{\partial L_4} &= 0 \\
 \frac{\partial y_i}{\partial L_5} &= \frac{X_i}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1} \\
 \frac{\partial y_i}{\partial L_6} &= \frac{Y_i}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1} \\
 \frac{\partial y_i}{\partial L_7} &= \frac{Z_i}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1} \\
 \frac{\partial y_i}{\partial L_8} &= \frac{1}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1} \\
 \frac{\partial y_i}{\partial L_9} &= -\frac{X_i(L_8 + L_5 X_i + L_2 Y_i + L_7 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2} \\
 \frac{\partial y_i}{\partial L_{10}} &= -\frac{Y_i(L_4 + L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2} \\
 \frac{\partial y_i}{\partial L_{11}} &= -\frac{Z_i(L_4 + L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2}
 \end{aligned}$$

Die partiellen Ableitungen der ersten Teilgleichung nach den Passpunktkoordinaten lauten:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial x_i}{\partial X_i} &= -\frac{L_1}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)} - \frac{L_{10}(L_4 + L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2} \\
 \frac{\partial x_i}{\partial Y_i} &= -\frac{L_2}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)} - \frac{L_{10}(L_4 + L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2} \\
 \frac{\partial x_i}{\partial Z_i} &= -\frac{L_3}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)} - \frac{L_{11}(L_4 + L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2}
 \end{aligned}$$

Die partiellen Ableitungen der zweiten Teilgleichung nach den Passpunktkoordinaten lauten:

$$\begin{aligned}\frac{\partial y_i}{\partial X_i} &= -\frac{L_5}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)} - \frac{L_9(L_8 + L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2} \\ \frac{\partial y_i}{\partial Y_i} &= -\frac{L_6}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)} - \frac{L_{10}(L_8 + L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2} \\ \frac{\partial y_i}{\partial Z_i} &= -\frac{L_7}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)} - \frac{L_{11}(L_8 + L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i)}{(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)^2}\end{aligned}$$

A.3 Partielle Ableitungen der Kollinearitätsgleichungen

Nach Luhmann (2002) werden zur Bildung der partiellen Ableitungen der Kollinearitätsgleichungen in einem ersten Schritt die Kamerakonstante mit $z' = -c$, die Zähler der Gleichungen mit k_X bzw. k_Y und die Nenner mit N substituiert:

$$\begin{aligned} z' &= -c \\ x' &= x'_0 + z' \cdot \frac{k_X}{N} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 + z' \cdot \frac{k_Y}{N} + \Delta y' \end{aligned}$$

Für die extrinsischen Parameter können die einzelnen Differentialquotienten folgendermassen gebildet werden:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x'}{\partial X_0} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{13}k_X - r_{11}N) \\ \frac{\partial x'}{\partial Y_0} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{23}k_X - r_{21}N) \\ \frac{\partial x'}{\partial Z_0} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{33}k_X - r_{31}N) \\ \frac{\partial x'}{\partial \omega} &= \frac{z'}{N} \cdot \left\{ \frac{k_X}{N} \cdot [r_{33}(Y - Y_0) - r_{23}(Z - Z_0)] - r_{31}(Y - Y_0) - r_{21}(Z - Z_0) \right\} \\ \frac{\partial x'}{\partial \varphi} &= \frac{z'}{N} \cdot \left\{ \frac{k_X}{N} \cdot [k_X \cdot \cos \kappa - k_Y \cdot \sin \kappa] + N \cdot \cos \kappa \right\} \\ \frac{\partial x'}{\partial \kappa} &= \frac{z'}{N} \cdot k_Y \\ \\ \frac{\partial y'}{\partial X_0} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{13}k_Y - r_{12}N) \\ \frac{\partial y'}{\partial Y_0} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{23}k_Y - r_{22}N) \\ \frac{\partial y'}{\partial Z_0} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{33}k_Y - r_{32}N) \\ \frac{\partial y'}{\partial \omega} &= \frac{z'}{N} \cdot \left\{ \frac{k_X}{N} \cdot [r_{33}(Y - Y_0) - r_{23}(Z - Z_0)] - r_{32}(Y - Y_0) - r_{22}(Z - Z_0) \right\} \\ \frac{\partial y'}{\partial \varphi} &= \frac{z'}{N} \cdot \left\{ \frac{k_X}{N} \cdot [k_X \cdot \cos \kappa - k_Y \cdot \sin \kappa] + N \cdot \sin \kappa \right\} \\ \frac{\partial y'}{\partial \kappa} &= \frac{z'}{N} \cdot k_X \end{aligned}$$

Für die intrinsischen Parameter lauten die linearisierten Differentialquotienten:

$$\begin{aligned}\frac{\partial x'}{\partial x'_0} &= 1 \\ \frac{\partial x'}{\partial c} &= \frac{k_X}{N} \\ \frac{\partial y'}{\partial y'_0} &= 1 \\ \frac{\partial y'}{\partial c} &= \frac{k_Y}{N}\end{aligned}$$

Und für die Ableitungen nach den Objektkoordinaten:

$$\begin{aligned}\frac{\partial x'}{\partial X} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{13}k_X - r_{11}N) \\ \frac{\partial x'}{\partial Y} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{23}k_X - r_{21}N) \\ \frac{\partial x'}{\partial Z} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{33}k_X - r_{31}N) \\ \frac{\partial y'}{\partial X} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{13}k_Y - r_{12}N) \\ \frac{\partial y'}{\partial Y} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{23}k_Y - r_{22}N) \\ \frac{\partial y'}{\partial Z} &= \frac{z'}{N^2} \cdot (r_{33}k_Y - r_{32}N)\end{aligned}$$

A.4 Partielle Ableitungen der Rolling-Shutter-Korrekturen

Zur Rolling-Shutter-Korrektur wurde folgender Zusammenhang angenommen:

$$x_{\text{kRS}} = x_i + y_i \cdot m_{\text{vert}} \cdot (x_i - x_{i-1})$$

Die partiellen Ableitungen der Gleichung lauten daher:

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial x_i} &= m_{\text{vert}} \cdot y_i + 1 \\ \frac{\partial f}{\partial x_{i-1}} &= -m_{\text{vert}} \cdot y_i \\ \frac{\partial f}{\partial y_i} &= m_{\text{vert}} \cdot (x_i - x_{i-1}) \\ \frac{\partial f}{\partial m_{\text{vert}}} &= y_i \cdot (x_i - x_{i-1})\end{aligned}$$

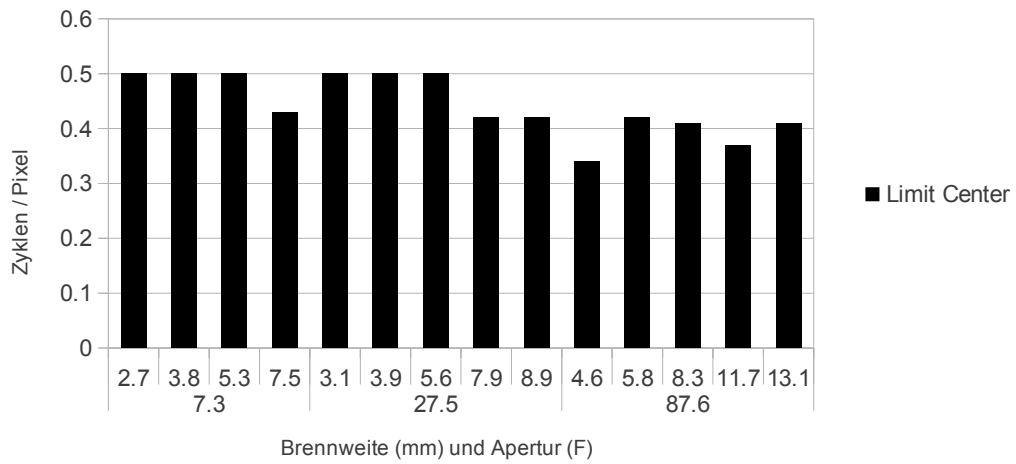
A.5 Parametereinstellungen der dynamischen Kalibration

Tab. A.1: Parameterkonfiguration, Funktion und Werte der Parameter für die dynamische Kalibration

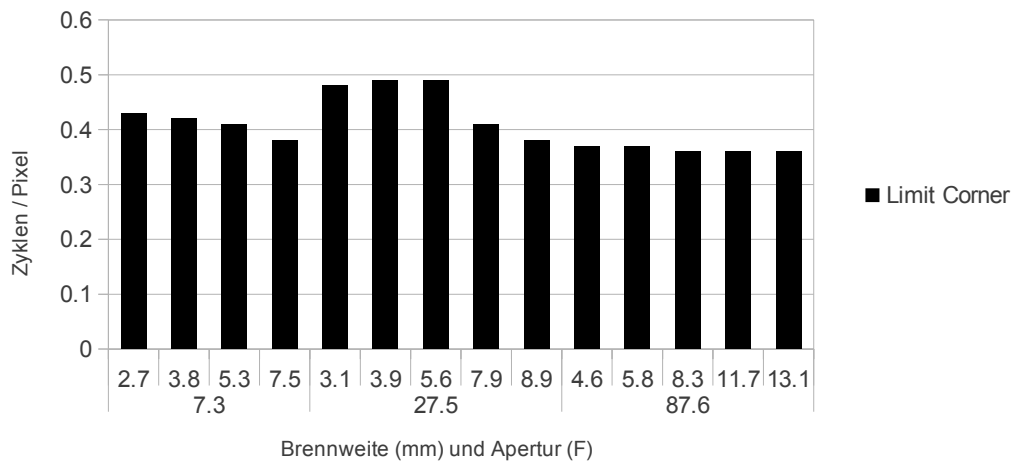
Parameter	Funktion	Wert
nonlinpar	Starteinstellungen für die Bouguet Toolbox	70 0 1 1 0 0
NL_UPDATE	nichtlinear optimierte Parameter	1 1 1 1 1 1
DO_GLOBAL_ITER	Iterative Bestimmung aktivieren	1
GLOBAL_ITER_MAX	maximale Anzahl an Iterationen	10
INL_TOL	Toleranz der Punkte in Pixel zum Start	3
NUM_CAMS_FILL	Kameras für Martinec-Pajdla-Verfahren	Anzahl Kameras -1
DO_BA	Bündelblockausgleich aktiviert	1
UNDO_RADIAL	Start mit Verzeichnungskorrektur	0
MIN_PTS_VAL		30
NTUPLES	Kameratupel zur Rekonstruktion	3
cams2use	verwendete Kameras	Anzahl Kameras
SQUARE_PIX	Quadratische Sensorpixel	1
START_BA	Beginne mit Bündelblockausgleich	0
BA_RADIAL	Bündelblockausgleich mit radialen Parametern	0
UNDO_HEIKK	Nutze Heikkilä-Notation für Objektivverzeichnung	0
USE_NTH_FRAME	Zwischenschritt zwischen den Einzelbildern	30
Res	Kamerauflösung	[512, 384]

A.6 Testergebnisse DIWA Labs

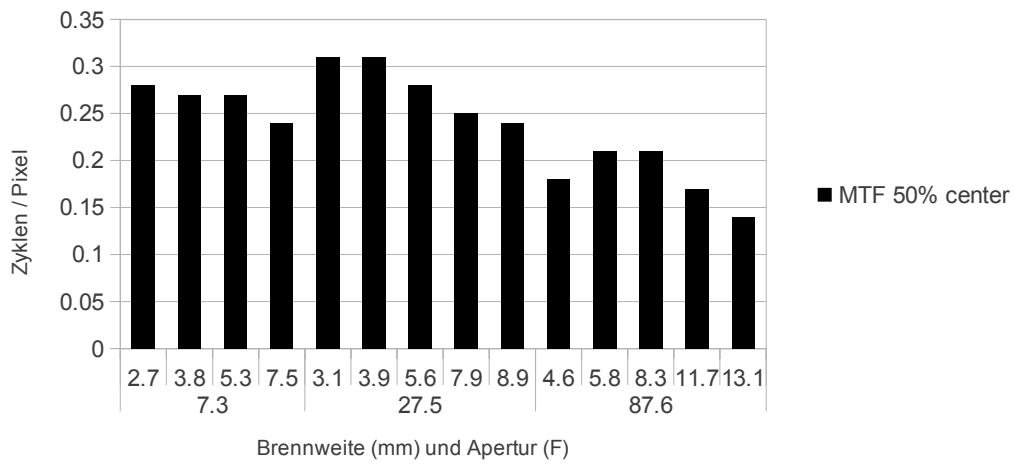
Auflösung bei MTF = 10%



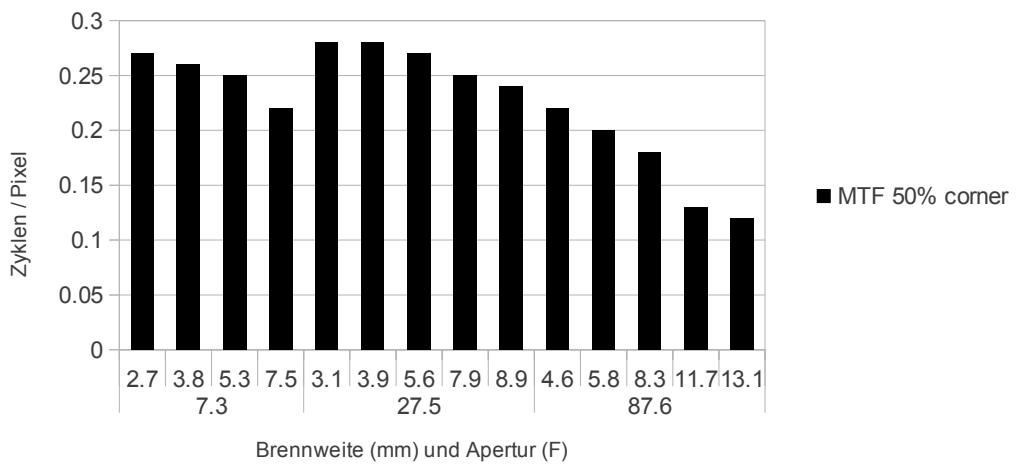
Auflösung bei MTF = 10%



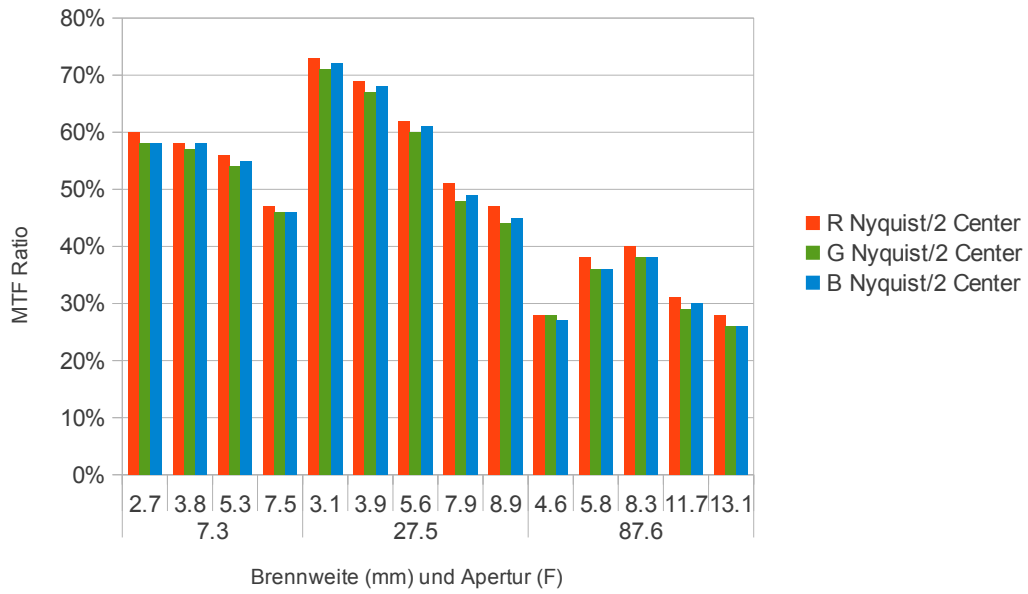
Auflösung bei MTF = 50%



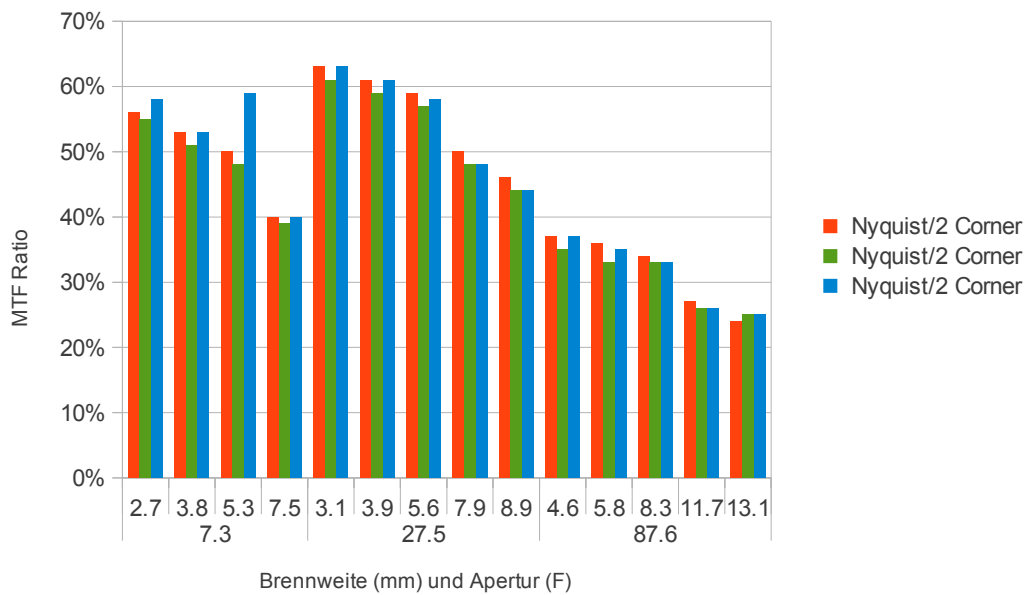
Auflösung bei MTF = 50%



MTF Nyquist/2

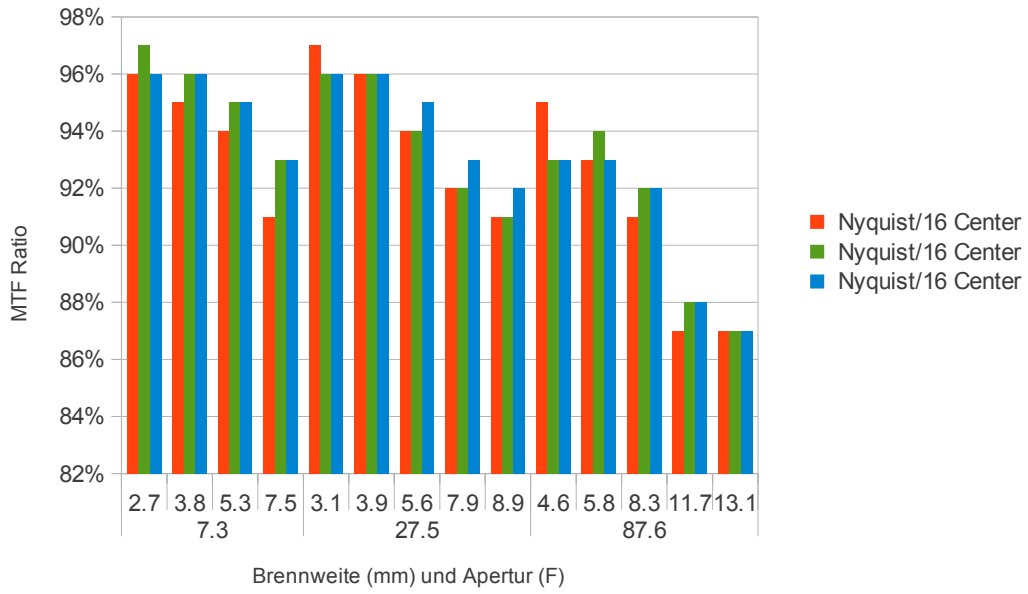


MTF Nyquist/2

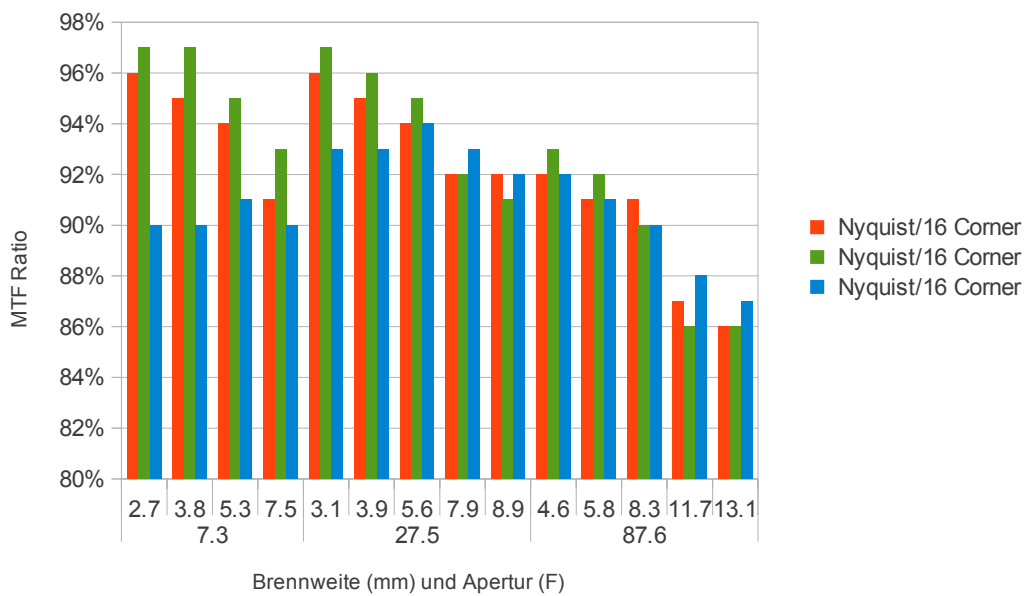


A. ANHANG

MTF Nyquist/16



MTF Nyquist/16



A.7 Funktionsübersicht DigitizeMe

Manual DigitizeMe

28.06.10

Short Manual

Digitalisiersoftware „DigitizeMe“

1 Einführung

Mit der Software können Koordinaten relevanter Punkte aus Videofiles bestimmt werden. Die Art der Punkte und deren Verbindungen und Zugehörigkeiten können in Projektfiles definiert werden (*.dpr) und erlauben dann einen programmgesteuerten Digitalisierprozess.

2 Beschreibung User Interface

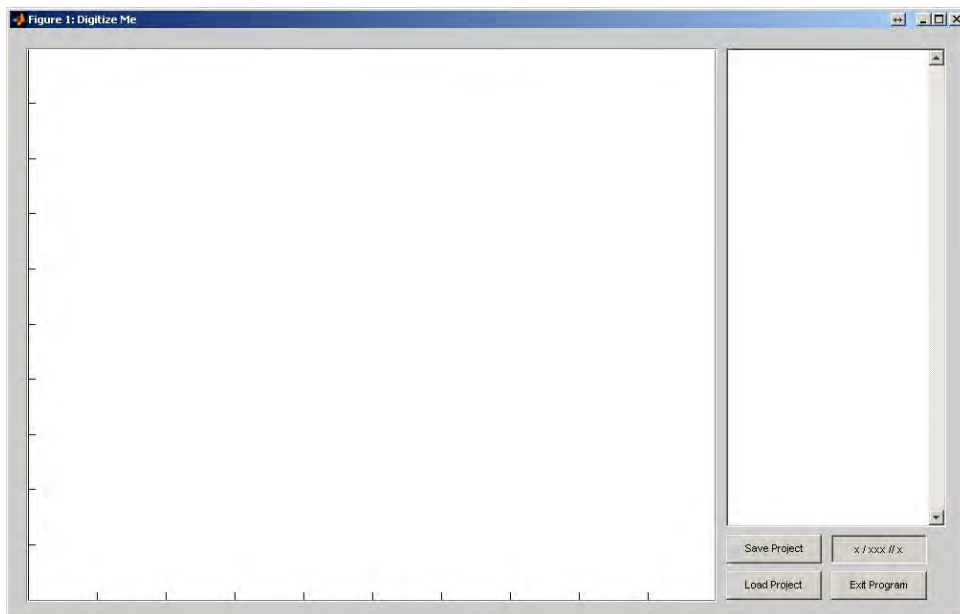


Abb. 1: User Interface nach dem Öffnen

Nach dem Öffnen des Programms erscheint das leere User-Interface, wie in Abb. 1. Neben den drei Buttons „Save Project“, „Load Project“ und „Exit Program“, werden im rechten oberen Teil des Programmfensters nach dem Laden eines Projekts die Markerdefinitionen angezeigt. Im rechten unteren Teil werden in dem Fenster das in Abb. 1 den Inhalt „x / xxx // x“ hat, die Fortschrittsinformation angezeigt und zwar in der Reihenfolge „aktuelles Bild / Anzahl Bilder der Szene // aktuelle Szene“.

3 Bedienung

Die Bedienung ist in folgende Teilschritte untergliedert:

1. Laden eines definierten Projektes

Der erste Schritt bei der Ausführung ist das Laden eines vordefinierten Projektfiles über den Button „Load Project“. In diesem sind alle notwendigen Informationen zum Digitalisieren enthalten (Art und Anzahl der Punkte, Filename des Videos, Anzahl der Szenen, Start und End-Bilder,...). Nach dem Laden dieses Projektfiles springt das Programm automatisch in den Modus „Digitalisieren“.

2. Auswahl des tatsächlichen Startframes

Nach dem Laden eines Projektes kann mittels den Tasten „Pfeil links“ (Bild zurück) und „Pfeil rechts“ (Bild vor) der Startframe zum Digitalisieren ausgewählt werden. Dies ist nur vor dem Digitalisieren des ersten Markerpunktes möglich. **In der Volleyball-Studie soll das Startbild so gewählt werden, dass der Ball gerade noch überhalb der oberen Netzkante ist.**

3. Digitalisieren

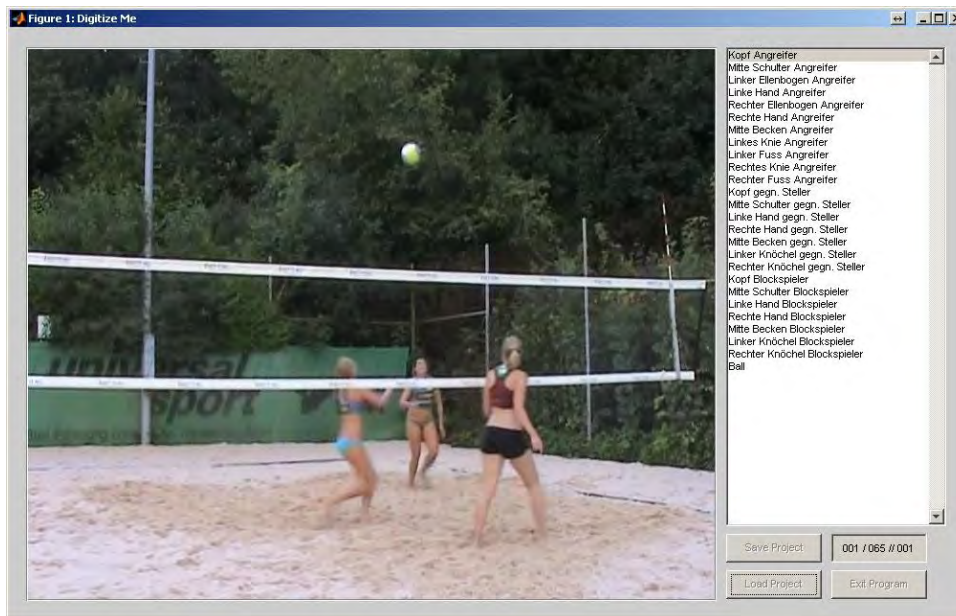


Abb.2: Geladenes Projekt, rechts im Bild die Markerdefinitionen und die Anzeige des aktuellen Bildes, der noch zu digitalisierenden Bilder und der Szenennummer

Mit dem Mauszeiger können jetzt die rechts in der Auswahlliste angezeigten Bildpunkte digitalisiert werden. Dabei wird immer der gerade hervorgehobene Markerpunkt digitalisiert (ein Klicken in die Auswahlliste zum Ändern der Reihenfolge wird ignoriert). Das Programm unterscheidet zwei Arten von Punkten, und zwar:

1. aktuell wirklich im Video sichtbare Punkte
2. aktuell durch andere Gegenstände verdeckte Punkte (Beispiel: die Hand des

gegnerischen Angreifers befindet sich verdeckt hinter dem Blockspieler)

In Situation 1 müssen die Punkte mit der linken Maustaste (entspricht dem wirklich sichtbaren Punkt) angeklickt werden, in Situation 2 mit der rechten Maustaste. Das resultiert in vollen Verbindungslinien für sichtbare Punkte und gestrichelten Linien für aktuell nicht sichtbare Punkte. Die Position der nicht sichtbaren Punkte müssen geschätzt werden.

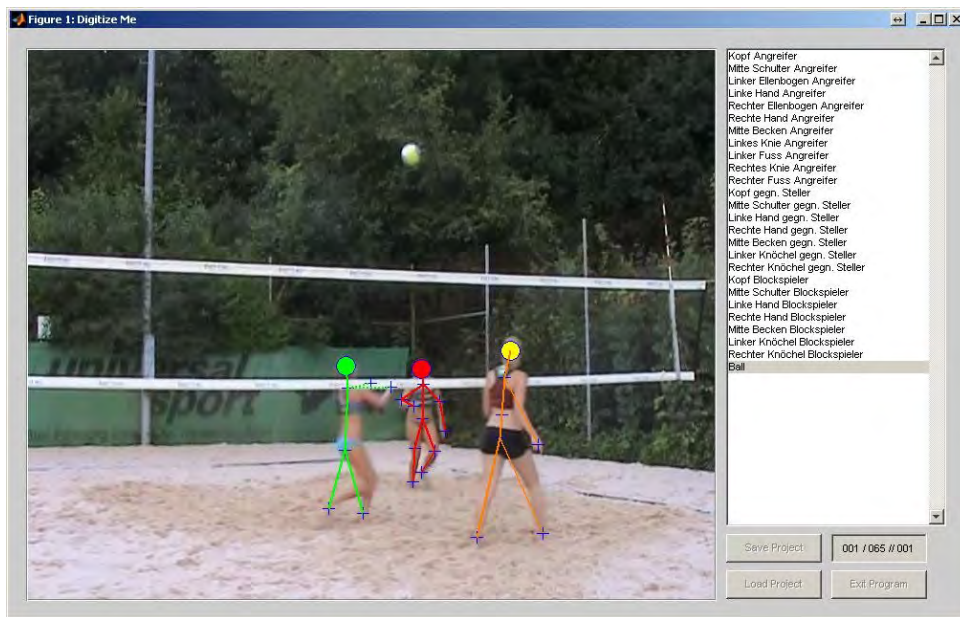


Abb.3: Geladenes Projekt, mit digitalisierten Markerpunkten

Falls man an die falsche Position geklickt hat oder Marker verwechselt hat, können mit der „Backspace“ Taste einzelne Markerpunkte gelöscht werden. Dabei werden auch die gezeichneten Striche und Punkte gelöscht. **Wichtig ist**, dass sich zur Benutzung dieser Funktion der Mauszeiger im Videobild befinden muss.

4. Speichern des Projektstandes

Mit der „ESC“ Taste kann der Digitalisier-Modus verlassen werden. Dann kann zum einen der Fortschritt durch Klicken auf den Button „Save Project“ gespeichert werden. Nach dem Klicken erfolgt automatisch die Wiederaufnahme des Digitalisier-Modus.

5. Beenden des Programms

Zum anderen kann durch den Klick auf „Exit Program“ das Programm beendet werden. Es wird automatisch nach dem Speichern des aktuellen Fortschritts gefragt. Das Programm darf nicht über das „X“ Symbol (rechter oberer Fensterrand) beendet werden, da sonst kein Speichern des aktuellen Fortschritts erfolgt.

4 Weitere Hinweise

1. Die Volleyball Videos bestehen aus mehreren Szenen. Es sollte darauf geachtet werden,

dass nach Möglichkeit in einer Session immer eine Szene komplett durchdigitalisiert wird.

2. Das Programm erzeugt automatisch Backup Files in einem Ordner „Backup“, diesen bitte nicht löschen, sondern nach Fertigstellen des Digitalisierens mit den Projektfiles (*.dpr) an uns zurückgeben. In den Files sind noch weitere Informationen zum Digitalisieren gespeichert (z.B. wird der aktuelle Projektstand bei jedem Programm-Ende gesichert – falls das Speichern vergessen wird).
3. Das Programm arbeitet mit relativen Pfadangaben. Deshalb darf die Struktur der Roh-Dateien (also Dateiname und Position im Ordner) nicht verändert werden. Am besten ist es, alle Dateien mit in den Ordner, in den ihr das Programm installiert habt, zu speichern.