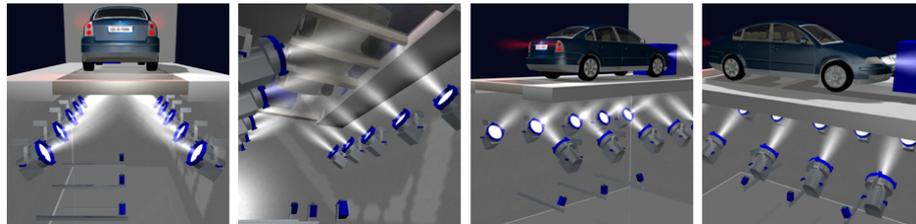


VOLKSWAGEN AG

LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND GEOINFORMATION

DIPLOMARBEIT

Photogrammetrische Auswertung der Aggregatbewegung im Sicherheitsversuch aus einer Fotogrube



vorgelegt von

Matthias Roland

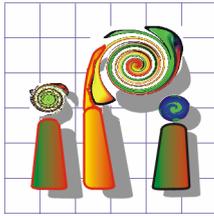
Matr. Nr.: 2175213

im

Mai 2007

ERSTPRÜFER:
ZWEITPRÜFER:

Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke
Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen



Institut für *Photogrammetrie* und *GeoInformation*
Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke

Nienburger Str. 1
D-30167 Hannover
Tel.: ++49-511/762-3304
Fax.: ++49-511/762-2483
e-mail: wigge@ipi.uni-hannover.de
<http://www.ipi.uni-hannover.de>

Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

Hannover, 21.12.2006

Diplomaufgabe für Herrn cand. geod. Matthias Roland

Thema: Photogrammetrische Auswertung der Aggregatbewegung im Sicherheitsversuch aus einer Fotogrube

Im Rahmen der Fahrzeugentwicklung spielt die Bewegung des Aggregats in Relation zum Fahrzeug während des Crashversuchs eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Insassensicherheit und der Strukturdeformation des Fahrzeugs. Um die dreidimensionale Bewegung des Aggregats zuverlässig messen zu können, sollen photogrammetrische Auswerteverfahren eingesetzt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Untersuchungen bzgl. der Kamerakonstellation, des eingesetzten Auswerteverfahrens und der erreichbaren Genauigkeit durchgeführt werden. Die Aufnahmen erfolgen aus einer Fotogrube unterhalb des Fahrzeugs. Diese Grube ist mit einer Plexiglasscheibe abgedeckt, die sich im Strahlengang der Kameras befindet. Die Brechungseigenschaften dieser Plexiglasscheibe müssen für eine exakte Positionsbestimmung von Messmarken am Fahrzeugunterboden und auf dem Aggregat bei der photogrammetrischen Auswertung berücksichtigt werden. Die notwendigen Maßnahmen sollen zunächst theoretisch untersucht werden und im Anschluss in praktischen Versuchen verifiziert werden. Dabei müssen sich die Maßnahmen optimal in den Prozess der Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung integrieren lassen.

Ziele dieser Arbeit:

- Berücksichtigung der Brechungseigenschaften der Plexiglasscheibe bei der photogrammetrischen Auswertung.
- Entwicklung von notwendigen Maßnahmen, die sich in den Prozessablauf integrieren lassen.
- Softwaretechnische Umsetzung der erweiterten Auswertung zur Positionsbestimmung von Messmarken am Fahrzeugboden.

Ausgabetermin:

Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit „*Photogrammetrische Auswertung der Aggregatbewegung im Sicherheitsversuch aus einer Fotogrube*“ selbstständig verfasst und die verwendeten Hilfsmittel sowie Referenzen vollständig genannt habe. Die Untersuchungen und Ergebnisse sind zuvor in keine andere Prüfungsarbeit eingegangen.

HINWEIS

Veröffentlichungen über den Inhalt dieser Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

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

Hannover, den 24. Mai 2007

Matthias Roland

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	6
1 EINLEITUNG	8
1.1 Zielsetzung der Arbeit	8
1.2 Gliederung der Arbeit	9
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	10
2.1 Grundlagen der geometrischen Optik	10
2.1.1 Reflektion und Brechung	10
2.1.2 Weitere optische Phänomene	11
2.2 Photogrammetrische Grundlagen	12
2.2.1 Koordinatensysteme	12
2.2.2 Innere Orientierung einer Kamera	14
2.2.3 Äußere Orientierung einer Kamera	15
2.2.4 Kollinearitätsgleichungen	16
2.2.5 Räumlicher Rückwärtsschnitt	17
2.2.6 Räumlicher Vorwärtsschnitt	18
2.2.7 Bündelausgleichung	18
2.3 Verfahren der Ausgleichsrechnung	19
2.3.1 Vermittelnde Ausgleichung (GAUSS – MARKOV – Modell)	20
2.3.2 Allgemeinfeld der Ausgleichung (GAUSS – HELMERT – Modell)	21
2.3.3 Beurteilung der Ausgleichungsansätze	22
2.3.4 Qualitätsmaße	23
3 MEHRMEDIENPHOTOGRAMMETRIE	25
3.1 Parallelität zwischen Bild- und Trennebene	25
3.2 Parallelität zwischen Bild- und planparalleler Trennebene	28
3.3 Bildqualität und Abweichungen vom Modell	29
4 VERFAHRESENTWICKLUNG	32
4.1 Problemstellung bei der Auswertung der Fahrzeugunterseite	32
4.2 Aufbau eines Passpunktfeldes in der Fotogrube	36
4.2.1 Planung	36
4.2.2 Passpunktadapter	37
4.2.3 Fotogrubenkoordinatensystem	37
4.2.4 Auswahl optimaler Kamerastandpunkte	39
4.2.5 Umsetzung	41
4.2.6 Zusammenfassung	42

4.3	Allgemeine Modellierung der Abbildungsgeometrie	43
4.3.1	Erste Untersuchungen	43
4.3.2	Strategie für die Modellierung der Abbildungsgeometrie	46
4.3.3	Orientierung der Acrylglasplatte im Strahlengang	47
4.3.4	Neuer Bezugspunkt für radiale Verschiebung	50
4.3.5	Berechnung relevanter Höhen	53
4.3.6	Auftreffwinkel der Abbildungsstrahlen auf die Brechungsebene	55
4.3.7	Radiale Verschiebung im Objektraum	56
4.3.8	Korrekturwerte für die Bildkoordinaten	56
4.3.9	Simulationssoftware und Zusammenfassung	58
4.4	Integration in die Filmauswertung	59
4.4.1	Durchführung einer dreidimensionalen Filmauswertung	60
4.4.2	Implementierung der Optimierungssoftware <i>KorAS</i>	62
4.4.3	Iterative Anwendung des Verfahrens	64
4.4.4	Zusammenfassung	65
4.5	Modellerweiterung um eine zusätzliche Acrylglasplatte	65
4.6	Fehlerhaushalt	67
4.6.1	Stabilität der Passpunkte und Kamerapositionen	68
4.6.2	Durchbiegung der Fotograbenabdeckung	71
4.6.3	Einfluss der Schutzfolie	72
4.6.4	Neuer Bezugspunkt	74
4.6.5	Parameter der Acrylglasplatte	75
4.6.6	Zusammenfassung	76
4.7	Zusammenfassung	77
5	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE	78
5.1	Verwendete Hardwaresysteme	78
5.1.1	Kameras	78
5.1.2	Beleuchtung und Zielmarken	80
5.1.3	Eigenschaften der Fotograbenabdeckungen	80
5.2	Erzielte Ergebnisse	82
5.2.1	Auswertung direkt im Fahrzeugsystem zum Zeitpunkt t_0	83
5.2.2	Auswertung im Fotogrubensystem ohne Korrektur	84
5.2.3	Auswertung im Fotogrubensystem mit Korrektur einer Scheibe	85
5.2.4	Auswertung im Fotogrubensystem mit Korrektur beider Scheiben	87
5.2.5	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	88
5.3	Zusammenfassung	91
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	92
7	LITERATURVERZEICHNIS	95

1 EINLEITUNG

Im Rahmen der Automobilentwicklung spielt die Fahrzeugsicherheit eine immer größer werdende Rolle. Die genaue Analyse durchgeführter Sicherheitsversuche dient der Untersuchung und dem Nachweis der Insassensicherheit und ist eine entscheidende Grundlage für die Verbesserung der eingesetzten Sicherheitssysteme. Darüber hinaus ist es Ziel der Analysen, eine optimale Informationsausbeute dieser Versuche zu erreichen. Hierbei bietet die optische Messtechnik eine immer leistungsstärkere und in den letzten Jahren etablierte Möglichkeit dreidimensionale Bewegungen des Fahrzeugs durch photogrammetrische Auswerteverfahren hochgenau zu bestimmen. Mit der Neufassung der ISO 8721 [ISO 8721, 1986] wird eine Norm zur Verfügung stehen, die die relevanten Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der photogrammetrischen Auswertergebnisse analysiert und bewertet. Unter Beachtung der für diese Norm entwickelten Kenngrößen [WIGGENHAGEN & RAGUSE, 2003] lassen sich präzise räumliche Informationen von signalisierten Messmarken aus den aufgenommenen Bildsequenzen der Sicherheitsversuche ableiten. Diese Auswertergebnisse ermöglichen zum einen eine Bewertung der dreidimensionalen Bewegung der Messpunkte an der Fahrzeugstruktur und zum anderen einen Vergleich zwischen den realen Versuchsabläufen und den Simulationsberechnungen, die in einer ersten Phase der Fahrzeugentwicklung mit virtuellen Fahrzeugvariationen durchgeführt werden [RAGUSE ET AL., 2004].

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Zurzeit beschränken sich die dreidimensionalen Bildsequenzauswertungen von Crashversuchen auf die Bestimmung der räumlichen Bewegung von Messmarken auf der Fahrzeughülle und auf den im Fahrzeug befindlichen Dummies. Hierfür werden in einem Kameraverband [Bild 1-1] synchrone Bildsequenzen vom Crashversuch aufgezeichnet und über photogrammetrische Verfahren ausgewertet.



Bild 1-1 **Kameraverband für die dreidimensionale Filmauswertung „von oben“**
Beispielhafte Darstellung von vier Aufnahmen für die dreidimensionale Filmauswertung „von oben“.

Aus diesen Ergebnissen können jedoch keine Informationen über die Bewegungen einzelner Fahrzeugbauteile, die sich innerhalb der Fahrzeughülle befinden, abgeleitet werden. Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens für die photogrammetrische Auswertung von signalisierten Messpunkten auf der Fahrzeugunterseite mit einer Genauigkeit von 5 mm und die

damit verbundene Bestimmung von Aggregat- und Motorbewegungen im Crashversuch. Bei der Verfahrensentwicklung sollen speziell Untersuchungen bezüglich der Kamerakonstellation, der eingesetzten Auswerteverfahren und der erreichbaren Genauigkeit durchgeführt werden.

Die Aufnahmen für diese Auswertungen erfolgen aus einer Fotogrube unterhalb des Fahrzeugs. Die Grube ist mit einer Acrylglasplatte abgedeckt, die sich im Strahlengang der Aufnahmen befindet. Für die präzise Positionsbestimmung von signalisierten Messmarken auf der Fahrzeugunterseite müssen die Brechungseigenschaften der Acrylglasplatte bei der dreidimensionalen Auswertung berücksichtigt werden. Neben der theoretischen Modellierung der Brechungseigenschaften sollen die entwickelten Maßnahmen in praktischen Versuchen verifiziert werden. Hierbei muss sich das entwickelte Verfahren optimal in die Prozesse der Versuchsvorbereitung, der Versuchsdurchführung und der Versuchsauswertung integrieren lassen.

1.2 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sechs Kapitel unterteilt. Im Anschluss an die Einleitung werden im zweiten Kapitel die theoretischen Grundlagen für diese Arbeit vorgestellt. Hierbei werden nach einem kurzen Überblick über die geometrische Optik, die relevanten photogrammetrischen Begriffe und Verfahren erläutert. Darüber hinaus werden die in dieser Arbeit benötigten Verfahren der Ausgleichsrechnung aufgeführt.

Kapitel 3 befasst sich mit Sonderfällen der Mehrmedienphotogrammetrie. Diese Sonderfälle fordern Parallelität zwischen Bild- und Brechungsebene und eignen sich sehr gut, um erste mathematische Zusammenhänge zwischen den Brechungseinflüssen und deren Auswirkungen auf der Bildebene herzuleiten.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Verfahrensentwicklung wird im vierten Kapitel vorgestellt. Nach einer detaillierten Beschreibung der einzelnen Problemstellen bei der Auswertung der Fahrzeugunterseite wird der Aufbau eines Passpunktfeldes in der Fotogrube erläutert. Anschließend folgen die theoretischen Überlegungen zur allgemeinen Modellierung der Brechungseinflüsse auf der Bildebene unabhängig von der gegenseitigen Ausrichtung der Bild- und Brechungsebene im Raum. Die umgesetzte Integration dieses Verfahrens in die Filmauswertung wird in einem weiteren Unterkapitel erläutert. Nach einer Modellerweiterung um eine zusätzliche Brechungsebene im Raum wird der Fehlerhaushalt, der aus dem Versuchsaufbau und dem entwickelten Verfahren resultiert, dargelegt.

In Kapitel 5 wird das entwickelte Verfahren für die dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite anhand praktischer Crashversuche verifiziert. Hierbei wird zunächst die Versuchsausrüstung beschrieben. Anschließend werden die, bei Auswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Brechungseigenschaften erzielten Ergebnisse aufgezeigt und bewertet.

Im sechsten Kapitel werden die bearbeiteten Aufgaben dieser Arbeit zusammengefasst. Auf Grundlage der gesammelten Erfahrungen aus den durchgeführten Versuchen wird abschließend ein Ausblick für eine weitere Optimierung der Abläufe bei der Versuchsvorbereitung, der Versuchsdurchführung und der Versuchsauswertung gegeben.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Grundlagen der geometrischen Optik

Die geometrische Optik ist ein Modell, in dem die Welleneigenschaften des Lichts vernachlässigt werden können, denn „*die Natur, wie sie die Quantenelektrodynamik beschreibt, erscheint dem gesunden Menschenverstand absurd*“ [FEYNMAN, 1990 - S. 21] und eignet sich nicht, optische Gesetzmäßigkeiten mit den Mitteln der analytischen Geometrie zu formulieren. Für den Bereich des sichtbaren Lichtes mit Wellenlängen zwischen 380 – 780 nm ist die Randbedingung, dass die dargestellten Objekte im Verhältnis zur Wellenlänge groß sein müssen, für diese Modellvorstellung erfüllt [BREUER, 1987 - S. 139]. Die Ausbreitung des Lichtes kann so als Lichtstrahl mit unendlich engem Öffnungswinkel beschrieben werden.

2.1.1 Reflexion und Brechung

Trifft elektromagnetische Strahlung auf eine Grenzfläche können unterschiedliche Phänomene auftreten. Eine polierte Oberfläche reflektiert den einfallenden Lichtstrahl, nach dem Reflexionsgesetz „*Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel*“, ganz oder teilweise. Die beiden Winkel werden zum Normalenvektor der Oberfläche im Auftreffpunkt gemessen, der mit dem einfallenden und dem reflektierten Lichtstrahl in einer Ebene liegt.

Der nicht reflektierte Teil des Lichtes dringt unter dem Auftreffwinkel α in das Medium ein und erfährt eine Richtungsänderung nach den Gesetzmäßigkeiten von SNEL VAN ROJEN (1580 – 1626), so dass sich der Lichtstrahl unter dem Brechungswinkel β im Medium ausbreitet. Dieser Zusammenhang ist bekannt als Brechungsgesetz von SNELLIUS [Bild 2-1 links]:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2-1)$$

Der gebrochene Strahl liegt ebenfalls mit dem einfallenden Strahl und der Flächennormalen im Auftreffpunkt komplanar. Die Brechzahl n ist eine dimensionslose physikalische Größe, die die optischen Eigenschaften des Mediums abhängig von der Wellenlänge des Lichtes beschreibt [BREUER, 1987 - S. 143]. Eine größere Brechzahl steht für ein optisch dichteres Medium, in dem der Lichtstrahl zur Flächennormalen hin gebrochen wird. Wird der Strahl so gebrochen, dass er sich von der Flächennormalen entfernt, handelt es sich um ein optisch dünneres Medium mit einer kleineren Brechzahl.

Das Phänomen der Lichtbrechung lässt sich über die unterschiedlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichtes in verschiedenen Medien erklären. Beim Medienübergang bleibt die Frequenz f des Lichtes konstant, die Wellenlänge λ ändert sich jedoch und führt über den

Zusammenhang $c = f \cdot \lambda$ zur Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit c . Die Brechzahl n lässt sich für jedes Material über

$$n = \frac{c_1}{c_2} \quad (2-2)$$

mit c_1 als Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und c_2 als Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im jeweiligen Medium bestimmen.

Des Weiteren wird ein Medium durch die Eigenschaften Homogenität und Isotropie charakterisiert, die mit Hilfe der Brechzahl beschrieben werden können. Bleibt die Brechzahl unabhängig vom Ort innerhalb des Mediums konstant, handelt es sich um ein homogenes Material. Isotrope Eigenschaften werden durch die Invarianz der Brechzahl gegenüber der Ausbreitungsrichtung des Lichtes beschrieben. Hieraus folgt, dass für die geradlinige Ausbreitung des Lichtes in einem Medium die Eigenschaften Homogenität und Isotropie erfüllt sein müssen [KOTOWSKI, 1987]. Alle folgenden Modelle und Berechnungen in dieser Arbeit beruhen auf dieser Annahme.

Sowohl das Reflexions- als auch das Brechungsgesetz lassen sich über das 1657 formulierte Extremalprinzip des kürzesten Lichtweges von PIERRE DE FERMAT (1601 – 1665) herleiten. Das FERMATSCHES Prinzip besagt, dass ein Lichtstrahl den Weg zwischen zwei Punkten einschlägt, der ihn in kürzester Zeit, also auf kürzestem Lichtweg, zum Ziel bringt [Bild 2-1 links]:

$$\int_{P_0}^{P_2} n(s) ds \rightarrow \text{Minimum} \quad (2-3)$$

Der Lichtweg wird über das Integral (2-3), mit $n(s)$ als verallgemeinerter, wegabhängiger Brechzahl und ds als differentiell kurzes Wegelement, beschrieben.

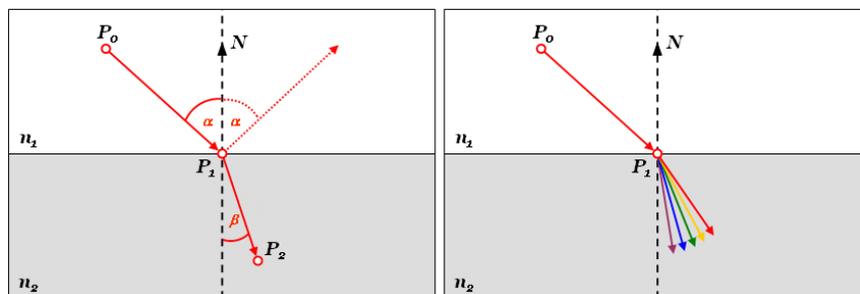


Bild 2-1 **Brechungsgesetz und Dispersion**
Links: Lichtbrechung an einer Grenzfläche, Rechts: Dispersion.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit und -richtung des Lichtes von den materialspezifischen, optischen Eigenschaften des Mediums, welches es durchläuft, abhängig sind.

2.1.2 Weitere optische Phänomene

DISPERSION:

Die Dispersion beschreibt in der Optik die Abhängigkeit der Brechzahl von der Wellenlänge. Sie wird z. B. bei fast allen transparenten Stoffen als normale Dispersion mit wachsender Brechzahl bei abnehmender Wellenlänge, also $\partial n / \partial \lambda < 0$ angegeben [Bild 2-1 rechts]. Für die meisten

Substanzen ist die Dispersion im sichtbaren Bereich jedoch gering und somit nicht relevant [BREUER, 1987 - S. 145].

ABSORPTION:

Dringen Lichtstrahlen in eine Materie ein, so wird ein Teil des Lichtes im Medium in Wärme, elektrische oder chemische Energie umgewandelt und somit vom Objekt absorbiert. Der Absorptionsgrad α_{AG} ist, neben seiner Materialabhängigkeit, zusätzlich von der Wellenlänge des Lichtes abhängig. Mit ρ als Reflexionsgrad und τ als Transmissionsgrad gilt für jedes absorbierend wirkendes Material $\rho + \alpha_{AG} + \tau = 1$ [BREUER, 1987 - S. 147].

ABERRATION:

Die sphärische und chromatische Aberration beschreibt Objektivfehler, die zu einer Abweichung von der idealen optischen Abbildung mit einem hochgenau definierten Brennpunkt führen. Die sphärische Aberration führt dazu, dass Randstrahlen stärker gebrochen werden als achsnahe parallel laufende Strahlen, die sich genau im Brennpunkt schneiden. Durch die stärkere Brechung wird die optische Achse von den Randstrahlen zwischen dem Brennpunkt und der Linse geschnitten, was bei einem punktförmigen Gegenstand im Bildraum einen Zerstreungskreis zur Folge hat. Ähnliches gilt für die chromatische Aberration, bei der das einfallende weiße Licht, je nach Wellenlänge, unterschiedlich von der Linse gebrochen wird (Dispersion). Dies führt dazu, dass z. B. blaue Lichtstrahlen eine kürzere Brennweite als rote haben und so um eine weiße Abbildung ein farbiger Bildsaum entsteht [BREUER, 1987 - S. 153].

2.2 Photogrammetrische Grundlagen

Um die Photogrammetrie als optisches, dreidimensionales Messverfahren einsetzen zu können, müssen bestimmte mathematische Grundlagen, die eine zentralperspektivische Abbildung beschreiben, bekannt sein.

Die benötigte Konfiguration zum Zeitpunkt der Aufnahme kann über die bekannte Abbildungsgeometrie innerhalb der Kamera und die genaue Position und Orientierung der Kamera im Raum bestimmt werden. Nach erfolgreicher Rekonstruktion der Aufnahmegeometrie kann für jeden gemessenen Bildpunkt, in Verbindung mit dem Projektionszentrum, die Raumrichtung für den jeweiligen Bildstrahl berechnet werden. Führen nun mindestens zwei homologe Bildstrahlen von unterschiedlichen Kamerastandpunkten zum gleichen Objektpunkt, können dessen dreidimensionale Koordinaten bestimmt werden.

2.2.1 Koordinatensysteme

In der digitalen Photogrammetrie werden Bildkoordinaten im zweidimensionalen, kartesischen *Sensor- oder Pixelkoordinatensystem* rc gemessen, dessen Ursprung in der oberen linken Bildecke liegt. Die in Pixel unterteilten Koordinatenachsen verlaufen in Zeilen- und Spaltenrichtung des jeweiligen Sensors [Bild 2-2 links].

Für die photogrammetrische Auswertung werden die Bildkoordinaten im *Bildkoordinatensystem*, welches zunächst als ebenes, kartesisches Koordinatensystem $x'y'$ definiert wird,

benötigt. Bei digitalen Kameras liegt der Ursprung in der Bildmitte, die über das Sensorformat und die Pixelgröße bestimmt werden kann [Bild 2-2 Mitte].

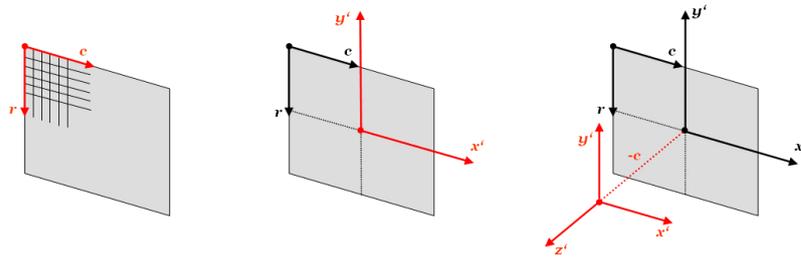


Bild 2-2

Bildkoordinatensysteme

Darstellung folgender Koordinatensysteme von links nach rechts: 2D – Pixelkoordinatensystem, 2D – Bildkoordinatensystem, 3D – Bildkoordinatensystem.

Über ein räumliches, kartesisches *Bildkoordinatensystem* $x'y'z'$ kann der Bezug zwischen dem ebenen Bild und der Kamera als räumlichem Objekt hergestellt werden. Der Ursprung dieses Systems befindet sich im Projektionszentrum der Kamera im Abstand der Kamerakonstanten c von der Bildebene. Durch die x' - und y' -Achse wird eine Ebene aufgespannt, die parallel zur Bildebene liegt, die z' -Achse steht senkrecht auf dieser Ebene und zeigt von der positiv abgebildeten Bildebene weg [HEIPKE, 1990]. Jeder Bildpunkt x', y' erhält durch diese Definition die z' -Koordinate $z' = -c$ und wird durch den Bildvektor $\bar{x}' = (x' \ y' \ -c)^T$, der den vom Bildpunkt zum Objektpunkt zeigenden Abbildungsstrahl im Bildkoordinatensystem beschreibt, repräsentiert [LUHMANN, 2000 – S. 118] [Bild 2-2 rechts].

Die dreidimensionalen *Objektkoordinaten* werden im übergeordneten räumlichen, kartesischen *Koordinatensystem* XYZ dargestellt, welches über festgelegte Bezugspunkte des Objektes definiert ist. In der Nahbereichsphotogrammetrie handelt es sich hierbei meist um lokale Koordinatensysteme. So wird z. B. im Automobilbau auf das Konstruktionssystem des Fahrzeugs als Objektkoordinatensystem zugegriffen [Bild 2-3 links].

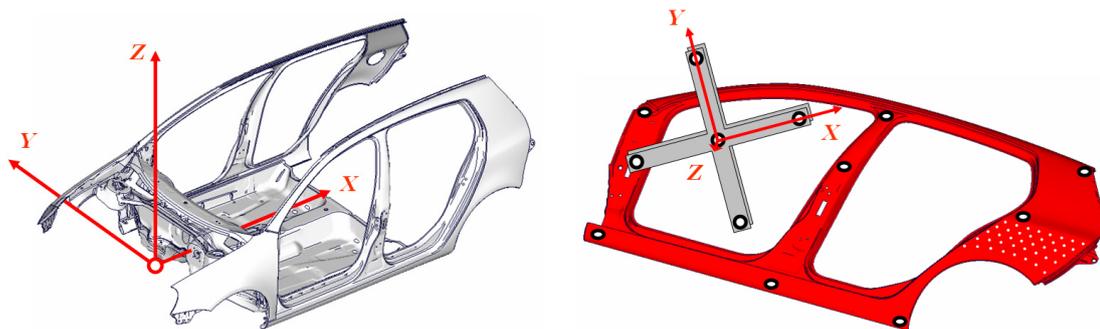


Bild 2-3

Fahrzeugkoordinatensystem und Koordinatensystem über Orientierungskreuz

Links: Darstellung des Fahrzeugkoordinatensystems: der Ursprung liegt mittig in der Vorderachse, die Orientierung der X -Achse zeigt vom Ursprung aus zum Heck, die Y -Achse zeigt nach rechts entlang der Vorderachse und die Z -Achse ergänzt das Rechtssystem. Rechts: Darstellung eines Orientierungskreuzes als lokal definiertes Objektkoordinatensystem.

Liegt kein bekanntes Objektkoordinatensystem vor, kann ein übergeordnetes Koordinatensystem durch die Einführung von Datumparametern geschaffen werden. Bei dreidimensionalen Koordinatensystemen existieren insgesamt sieben Freiheitsgrade, die durch die Einführung von sieben Datumparametern festgelegt werden können. Hierzu zählen die Festlegung des

Koordinatenursprungs (drei Translationen), die Ausrichtung der Koordinatenachsen (drei Rotationen) und die Bestimmung des Maßstabs. In der Praxis können für diesen Anwendungsfall z. B. Orientierungskreuz, Maßstäbe oder Kalibriertafeln verwendet werden [Bild 2-3 rechts].

2.2.2 Innere Orientierung einer Kamera

Die Parameter der inneren Orientierung beschreiben die hochgenaue Modellierung des vollständigen Abbildungsvorgangs in der Kamera, der sich über die Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Bildkoordinatensystem und den Abweichungen von der zentralperspektivischen Abbildung rekonstruieren lässt.

Für die Definition dieser Parameter wird das dreidimensionale, kartesische Bildkoordinatensystem $x'y'z'$ in den Bildmittelpunkt der positiv abgebildeten Bildebene verschoben [Bild 2-4].

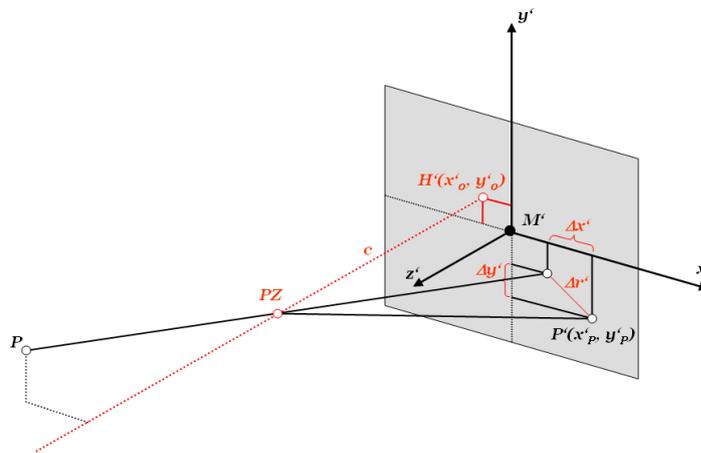


Bild 2-4 **Innere Orientierung**
Darstellung der Parameter der inneren Orientierung. Hierzu zählen die in rot eingefärbten Werte $H'(x'_0, y'_0)$, c , $\Delta x'$ und $\Delta y'$.

Über die Parameter der inneren Orientierung werden die Lage des Projektionszentrums durch den *Bildhauptpunkt* $H'(x'_0, y'_0)$ und die *Kamerakonstante* c bestimmt. Hierbei beschreibt der Bildhauptpunkt den Durchstoßpunkt der optischen Achse durch die Bildebene, der über die Lotfußpunktkoordinaten des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem definiert ist und näherungsweise in der Bildmitte liegt ($H' \sim M'$). Der lotrechte Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene wird durch die Kamerakonstante c dargestellt.

Hinzu kommen Parameter, die die Abweichungen vom mathematischen Modell der Zentralperspektive beschreiben. In der Nahbereichsphotogrammetrie wird für deren Beschreibung häufig das Brown'sche Modell [BROWN, 1971] eingesetzt. In diesem Modell werden die Abweichungen über Korrekturfunktionen für die radial-symmetrische, radial-asymmetrische und die tangentielle Verzeichnung, sowie die Affinität und Scherung zu achsenbezogenen Korrekturwerten $\Delta x'$, $\Delta y'$ umgerechnet.

RADIAL-SYMMETRISCHE VERZEICHNUNG:

Die radial-symmetrische Verzeichnung, die für den größten Anteil des Abbildungsfehlers verantwortlich ist, entsteht durch die Brechungsänderungen des Bildstrahls an den Linsen des

Objektivs [LUHMANN, 2000 – S. 119]. Beschrieben wird die radial-symmetrische Verzeichnung durch ein Polynom ungerader Potenzen des Bildradius.

RADIAL-ASYMMETRISCHE UND TANGENTIALE VERZEICHNUNG:

Die radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung ist auf eine eventuelle Dezentrierung der Linsen im Objektiv zurückzuführen [LUHMANN, 2000 – S. 121]. Ihr Fehlereinfluss ist in der Regel deutlich geringer, als der der radial-symmetrischen Verzeichnung.

AFFINITÄT UND SCHERUNG:

Durch die Berücksichtigung von Affinität und Scherung können eventuelle Abweichungen des Bildkoordinatensystems von Orthogonalität und Gleichmaßstäbigkeit der Koordinatenachsen berücksichtigt werden [LUHMANN, 2000 – S. 122].

Sind die Parameter der inneren Orientierung durch eine Kamerakalibrierung oder aus Herstellerangaben bekannt, kann der Bildstrahl von jedem beliebigen Bildpunkt x' , y' als Abbildungsvektor \bar{x}' dargestellt werden:

$$\bar{x}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_p - x'_o + \Delta x' \\ y'_p - y'_o + \Delta y' \\ -c \end{pmatrix} \quad (2-4)$$

2.2.3 Äußere Orientierung einer Kamera

Neben der inneren Orientierung sind die Parameter der äußeren Orientierung für die Rekonstruktion der Aufnahmegeometrie erforderlich. Sie beschreiben die räumliche Lage und Ausrichtung einer Kamera in einem übergeordneten Koordinatensystem. Durch das Projektionszentrum als gemeinsamen Punkt kann ein Zusammenhang zwischen dem übergeordneten Objektkoordinatensystem und dem Bildkoordinatensystem hergestellt werden.

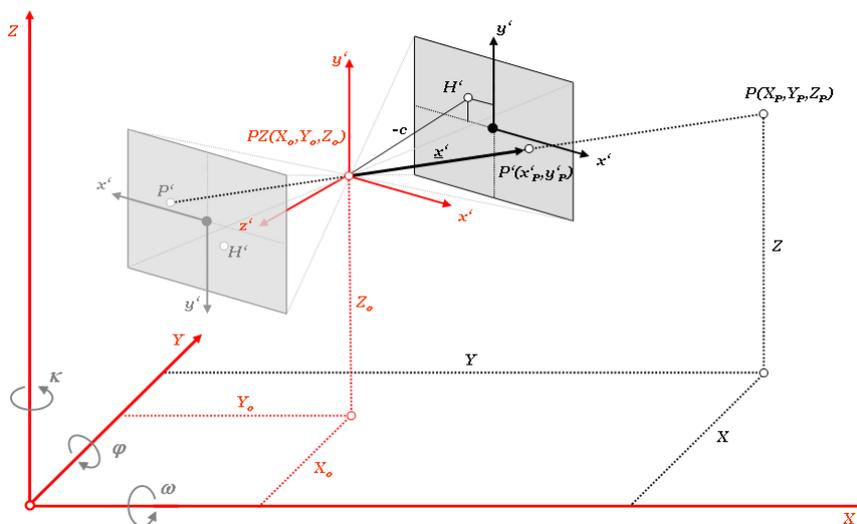


Bild 2-5

Äußere Orientierung

Darstellung der Parameter der äußeren Orientierung und des Bildvektors \bar{x}' .

Beschrieben wird die äußere Orientierung durch die *drei Translationen* X_0, Y_0, Z_0 , die die Lage des Projektionszentrums im übergeordneten Objektkoordinatensystem festlegen und die *drei Rotationen* ω, φ, κ um die jeweiligen Koordinatenachsen [Bild 2-5]. Die Rotationswinkel definieren die räumliche Ausrichtung des Bildkoordinatensystems durch die Rotationsmatrix R , welche die Drehungen um jede der drei Koordinatenachsen zusammenfasst. Von wichtiger Bedeutung ist hierbei die Drehreihenfolge, mit der die Rotationsmatrix aufgebaut wird. Sie unterscheidet sich beim Standardfall der Senkrechtaufnahme in der Luftbildphotogrammetrie und beim Spezialfall der terrestrischen Photogrammetrie.

Drehreihenfolge ω, φ, κ (Luftbild):

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (2-5)$$

Drehreihenfolge φ, ω, κ (terrestrisch):

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa + \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa + \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa & \sin \varphi \cos \omega \\ \cos \omega \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \\ -\sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa & \sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa & \cos \varphi \cos \omega \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

Der unter Kapitel 2.2.2 aufgestellte Abbildungsvektor \bar{x}' (2-4) kann über die bekannten Parameter der äußeren Orientierung in das übergeordnete Objektkoordinatensystem transformiert werden und definiert so in diesem System den räumlichen Strahl vom Projektionszentrum zum Objektpunkt [LUHMANN, 2000 – S. 225].

2.2.4 Kollinearitätsgleichungen

Die Kollinearitätsgleichungen werden als Grundgleichungen der analytischen Photogrammetrie bezeichnet [LUHMANN, 2000 – S. 228]. Sie definieren über die innere und äußere Orientierung der Aufnahme den Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten bei einer zentralperspektivischen Abbildung.

Die zentralperspektivische Abbildung eines Bildpunktes in den Objektraum lässt sich über folgende Gleichung beschreiben:

$$\bar{X} = \bar{X}_0 + m \cdot R \cdot \bar{x}' \quad (2-7)$$

Hierbei beschreibt \bar{X}_0 den Vektor vom Koordinatenursprung des Objektkoordinatensystems zum Projektionszentrum. Das Produkt $m \cdot R \cdot \bar{x}'$ setzt sich aus dem Bildvektor \bar{x}' , der Rotationsmatrix R sowie einem für jeden Objektpunkt individuellen, unbekanntem Maßstab m zusammen und legt den Vektor vom Projektionszentrum zum Objektpunkt, ebenfalls im Objektkoordinatensystem, fest [LUHMANN, 2000 – S. 226].

Nach Erweiterung der Gleichung (2-7) um die Parameter der inneren Orientierung ergibt sich:

$$\bar{x}' - \bar{x}'_0 - \Delta \bar{x}' = \frac{1}{m} \cdot R^{-1} \cdot (\bar{X} - \bar{X}_0) \quad (2-8)$$

Aus dieser Gleichung lassen sich die Kollinearitätsgleichungen direkt ableiten [LUHMANN, 2000 - S. 227]:

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (2-9)$$

Über diese Gleichung kann eine Transformation von gegebenen Objektkoordinaten, bei bekannter innerer und äußerer Orientierung, in Bildkoordinaten durchgeführt werden.

2.2.5 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Die äußere Orientierung eines Einzelbildes im Nahbereich kann über verschiedene Verfahren indirekt bestimmt werden. Eine direkte Messung der Orientierungsunbekannten, wie sie in der Luftbildphotogrammetrie durch GPS und inertielle Messsysteme verbreitet ist, ist im Nahbereich oft nur schwer umsetzbar [WIGGENHAGEN, 2006]. Das geläufigste indirekte Verfahren ist der räumliche Rückwärtsschnitt auf Basis der Kollinearitätsgleichungen.

Der räumliche Rückwärtsschnitt wird im Zuge einer vermittelnden Ausgleichung [Kapitel 2.3.1] berechnet, in der jeder gemessene Bildpunkt zwei linearisierte Verbesserungsgleichungen liefert. Da es bei bekannter innerer Orientierung sechs Orientierungsunbekannte für die Parameter der äußeren Orientierung gibt, müssen die XYZ – Koordinaten von mindestens drei Objektpunkten gegeben sein. Zusätzlich müssen für die Ausgleichung Näherungswerte für die Orientierungsunbekannten vorliegen, in denen das System durch eine TAYLOR – Entwicklung linearisiert werden kann.

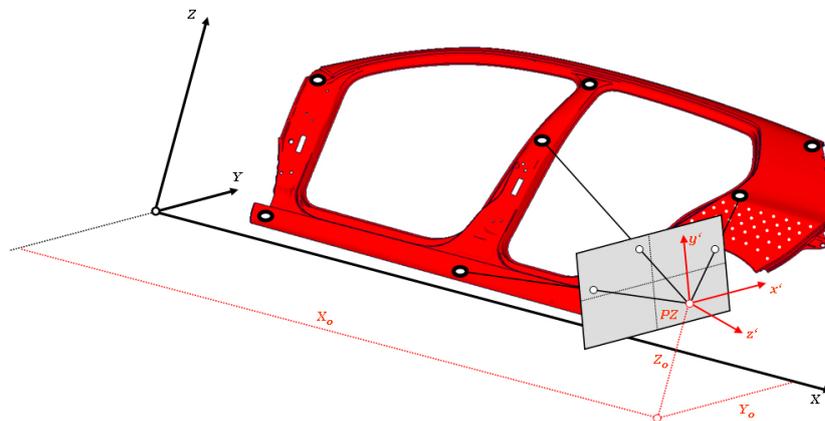


Bild 2-6

Räumlicher Rückwärtsschnitt

Bestimmung der äußeren Orientierung im Fahrzeugkoordinatensystem über mindestens 3 bekannte Passpunkte auf dem Bauteil.

Der oben beschriebene mathematische Zusammenhang bedeutet, dass sich das Strahlenbündel, welches durch die in diesem Fall drei Objektpunkte und das Projektionszentrum aufgespannt wird, in nur einer eindeutigen Position und Orientierung auf die Bildpunkte in der Bildebene einpassen lässt [LUHMANN, 2000 – S. 228] [Bild 2-6], solange die drei Punkte nicht auf einer Geraden liegen.

2.2.6 Räumlicher Vorwärtsschnitt

Sind innere und äußere Orientierung der beteiligten Bilder der Aufnahme bekannt, kann die gesamte Aufnahmekonfiguration rekonstruiert werden. So lassen sich über die in den einzelnen Bildern gemessenen Bildkoordinaten eines gemeinsamen Objektpunktes die dreidimensionalen Objektpunktkoordinaten mit Hilfe des räumlichen Vorwärtsschnitts berechnen [Bild 2-7].

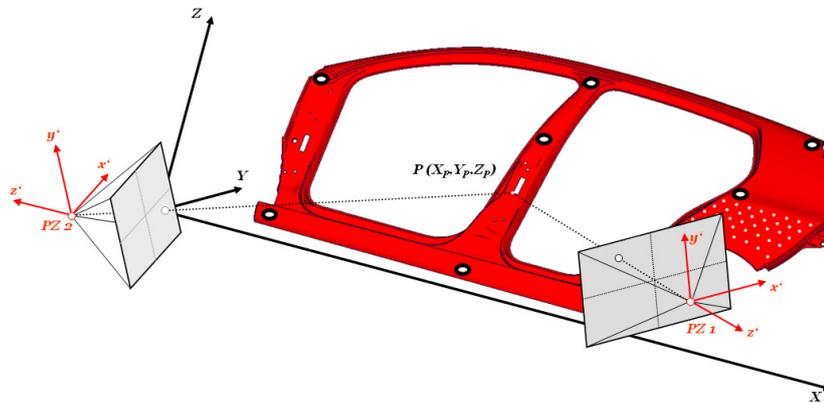


Bild 2-7 **Räumlicher Vorwärtsschnitt**
Bestimmung der Objektpunktkoordinaten eines Punktes aus zwei orientierten Aufnahmen.

Das zugrunde liegende funktionale Modell wird ebenfalls über die Kollinearitätsgleichungen beschrieben und im Zuge einer vermittelnden Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate [Kapitel 2.3.1] gelöst. Als eingehende Beobachtungen liegen die gemessenen Bildkoordinaten x_p' , y_p' vor. Die drei Unbekannten setzen sich aus den Koordinaten X_P , Y_P , Z_P des beobachteten Objektpunktes zusammen. Bereits durch die Bildpunktmessung in zwei Bildern (vier Beobachtungen) ist die Lösung des Ausgleichungsmodells überbestimmt, jedoch lassen sich grobe Fehler nur sehr schwer aufdecken. Die Hinzunahme weiterer Kamerastandpunkte lässt die Zuverlässigkeit und bei günstiger Standortwahl auch die Genauigkeit der Punktbestimmung steigen.

Eine Möglichkeit der Darstellungsform für die Genauigkeit des berechneten Objektpunktes sind Konfidenzellipse [Kapitel 2.3.4], die Bereiche um die geschätzte Punktlage angeben, in denen die wahren Werte der Unbekannten mit vorgewählter Wahrscheinlichkeit $(1 - \alpha)$ liegen. Über die Form des Konfidenzellipsoids kann eine Aussage über die Schnittgeometrie beim Vorwärtsschnitt getroffen werden. Handelt es sich um Bildpunktmessungen gleicher Genauigkeit, deutet ein gestrecktes Konfidenzellipsoid auf einen schleifenden Schnitt homologer Raumstrahlen hin [LUHMANN, 2000 – S. 319].

2.2.7 Bündelausgleichung

Die Bündelausgleichung (Bündeltriangulation, Mehrbildtriangulation) dient der gemeinsamen Bestimmung der äußeren Orientierung aller Bilder eines Bildverbandes und der Berechnung der Objektkoordinaten sämtlicher Verknüpfungspunkte. Als Beobachtungen für den Ausgleichungsalgorithmus stehen dafür die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte, sowie die Bild- und Objektkoordinaten eventueller Passpunkte zur Verfügung.

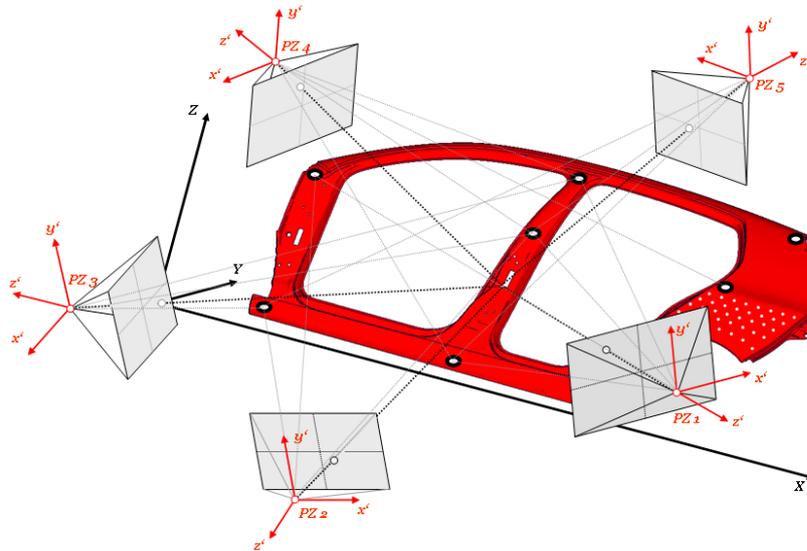


Bild 2-8 Bündelausgleichung
Darstellung eines Bildverbandes mit fünf Aufnahmen im Fahrzeugkoordinatensystem.

Die rechnerische Einpassung der Bilder im Raum erfolgt über die geometrische Bedingung des optimalen Schnitts aller homologen Bildstrahlen im jeweiligen Objektpunkt. So können die einzelnen Bilder zu einem Gesamtmodell verknüpft werden, in dem bereits dreidimensionale Messungen durchgeführt werden können [Bild 2-8]. Über eine minimale Anzahl von Passpunkten lässt sich der Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem herstellen, so dass passpunktlose Räume durch Bildverbände überbrückt werden können [LUHMANN, 2000 – S. 255].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bündelausgleichung das leistungsfähigste und genaueste Verfahren zur Bestimmung der äußeren Orientierung und Berechnung von Objektpunktkoordinaten ist, da alle Beobachtungen und Unbekannten eines Bildverbandes in einen simultanen Berechnungsvorgang einfließen [LUHMANN, 2000 – S. 255].

2.3 Verfahren der Ausgleichsrechnung

Die Methoden der Ausgleichsrechnung zur Lösung überbestimmter, nichtlinearer Gleichungssysteme bilden eine entscheidende Grundlage vieler photogrammetrischer Rechenverfahren. Zur Bestimmung geometrischer Informationen aus Photographien dienen die gemessenen Bildkoordinaten einzelner Punkte als beobachtete Größen, die in einem funktionalen Zusammenhang mit den unbekanntenen Größen, meist den Objektpunktkoordinaten oder den äußeren Orientierungen der Kameras, stehen. Dieser funktionale Zusammenhang kann auf Grundlage der Kollinearitätsgleichungen beschrieben werden (2-9), die für jeden gemessenen Bildpunkt aufgestellt werden können. Werden mehr Bildkoordinaten beobachtet als für die Bestimmung der Unbekannten notwendig sind, kann aufgrund von systematischen und zufälligen Fehlern keine eindeutige Lösung des Zusammenhangs erfolgen und die zu bestimmenden Parameter können über Ausgleichsverfahren in funktionalen und stochastischen Modellen geschätzt werden. Bei der Modellbildung muss unterschieden werden, ob jeweils eine Beobachtung als Funktion von allen eingeführten Parametern dargestellt werden

kann [Kapitel 2.3.1] oder ob in den funktionalen Beziehungen gleichzeitig mehrere Beobachtungen und Unbekannte vorkommen können [Kapitel 2.3.2]. Bei der Interpretation von Ausgleichungsergebnissen ist zu beachten, dass es sich bei den funktionalen Beziehungen zwischen Beobachtungen und Unbekannten um Modelle handelt, deren Gültigkeit mit statistischen Methoden zu überprüfen ist [NIEMEIER, 2002 – S. 100].

2.3.1 Vermittelnde Ausgleichung (GAUSS – MARKOV – Modell)

Das GAUSS – MARKOV – Modell beschreibt eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen, bei der jeweils eine Beobachtung L_i als Funktion sämtlicher Unbekannten X_j dargestellt werden kann. Da Beobachtungen mit einer Standardabweichung σ_i versehen sind, muss für jede Messung eine Kompensationsgröße, die Verbesserung v_i , bestimmt werden. Im funktionalen Modell können im Zusammenhang mit den Verbesserungen die ausgeglichenen Unbekannten \hat{X}_j eingeführt werden. Die nichtlinearen Verbesserungsgleichungen ergeben sich so zu

$$L_i + v_i = \varphi_i(\hat{X}_1, \hat{X}_2, \hat{X}_3, \dots, \hat{X}_u) \quad (2-10)$$

und können in vielen photogrammetrischen Anwendungen direkt durch die Kollinearitätsgleichungen (2-9) ausgedrückt werden.

Da bei der Parameterschätzung lineare Beziehungen zwischen den Beobachtungen und den Unbekannten angenommen werden, ist für jede Verbesserungsgleichung eine Linearisierung durchzuführen. Liegen Näherungswerte X^0 für die Unbekannten vor, können die Verbesserungsgleichungen durch eine Reihenentwicklung nach TAYLOR in den Näherungswerten beschrieben werden. Die für die Reihenentwicklung benötigten partiellen Ableitungen in X^0 können in der Designmatrix A zusammengefasst werden:

$$\underset{(n,u)}{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1u} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nu} \end{pmatrix} \quad \text{mit: } a_{ij} = \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial X_j} \right)_{X^0} \quad (2-11)$$

Hierbei beschreibt n die Anzahl der eingeführten Beobachtungen und u die Anzahl der zu schätzenden Parameter. Das linearisierte funktionale Modell ergibt sich in Matrixschreibweise zu:

$$\underset{(n,1)}{l} + \underset{(n,1)}{v} = \underset{(n,u)}{A} \cdot \underset{(u,1)}{\hat{x}} \quad (2-12)$$

Des Weiteren müssen Genauigkeitsaussagen über die einzelnen Beobachtungen vorliegen, die als a priori Genauigkeiten im stochastischen Modell verwaltet werden. Sie werden als Varianzen σ_i^2 auf der Hauptdiagonalen der Kovarianzmatrix Σ_{LL} , die zusätzlich Informationen über Korrelationen zwischen den Beobachtungen enthalten kann, zusammengefasst. Durch elementweise Division mit der a priori Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 ergibt sich die Kofaktormatrix Q_{LL} , die Aussagen über die Genauigkeitsrelationen und über eventuelle Korrelationen zwischen den Beobachtungen enthält. Die Inverse der Kofaktormatrix Q_{LL} bildet die Gewichtsmatrix P , über die einzelne Beobachtungen eine unterschiedliche Bedeutung bei der Parameterschätzung erhalten können.

Die im GAUSS – MARKOV – Modell verwendete Ausgleichungsforderung basiert auf der Minimierung der gewichteten Verbesserungsquadratsumme und wird daher auch als Methode der

kleinsten Quadrate bezeichnet. Zur Lösung eines solchen Ausgleichsproblems lässt sich nach [PELZER, 1985] ein Rechenschema einsetzen, über das die Normalgleichungen

$$\frac{N}{(u,u)} \cdot \frac{\hat{x}}{(u,1)} - \frac{n}{(u,1)} = \frac{0}{(u,1)} \quad (2-13)$$

gelöst werden können. So können Kofaktormatrix $Q_{xx} = N^{-1} = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1}$, Verbesserungen $v = A \cdot \hat{x} - l$, ausgeglichene Beobachtungen $\hat{L} = L + v$, a posteriori Standardabweichung

$$s_0 = \sqrt{\frac{(v^T \cdot P \cdot v)}{n - u}}, \quad (2-14)$$

Unbekanntenvektor

$$\hat{X} = X^0 + \hat{x} \quad \text{mit:} \quad \hat{x} = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot l \quad (2-15)$$

und Varianz – Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{X}\hat{X}} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot Q_{XX}$ bestimmt werden. Abschließend lassen sich in einer Schlussprobe alle Berechnungsschritte, nach Aufstellung des funktionalen und stochastischen Modells, kontrollieren, indem die ausgeglichenen Parameter in den funktionalen Zusammenhang eingesetzt werden. Die Abweichungen zwischen diesen Berechnungen und den ausgeglichenen Beobachtungen liegen bei korrekten Computerlösungen in der Regel bei ca. 10^{-6} bis 10^{-8} . Liegen größere Abweichungen vor, könnten diese ein Indiz für unzureichende Näherungswerte sein, die im Zuge einer iterativen Ausgleichung verbessert werden können [NIEMEIER, 2002 – S. 128].

2.3.2 Allgemeinfeld der Ausgleichung (GAUSS – HELMERT – Modell)

Liegt ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Messwerten und den Parametern vor, bei dem nicht jede Beobachtung als eigene Funktion von sämtlichen Unbekannten ausgedrückt werden kann, sondern nur eine implizite Formulierung des Zusammenhangs $\varphi(\hat{L}, \hat{X}) = 0$ existiert, muss zur Parameterschätzung das GAUSS – HELMERT – Modell verwendet werden. Zur Linearisierung der Beziehungen (auch Bedingungsgleichungen genannt) müssen wieder Näherungswerte X^0 für die Unbekannten und aus $\varphi(L^0, X^0) = 0$ resultierende Näherungen L^0 für die Beobachtungen aufgestellt werden. Bei der anschließenden Reihenentwicklung nach TAYLOR ist darauf zu achten, dass die partiellen Ableitungen sowohl nach den Beobachtungen, als auch nach den Unbekannten zu bilden sind. Werden die Ableitungen nach den Beobachtungen in der Matrix B , die Ableitungen nach den Unbekannten in der Matrix A zusammengefasst und wird über $\varphi(L, X^0)$ der Widerspruchsvektor w aufgestellt, kann das linearisierte funktionale Modell für den Allgemeinfeld der Ausgleichung durch

$$\frac{B}{(b,n)} \cdot \frac{v}{(n,1)} + \frac{A}{(b,u)} \cdot \frac{x}{(u,1)} + \frac{w}{(b,1)} = \frac{0}{(b,1)} \quad (2-16)$$

beschrieben werden. Hierbei beschreibt b die Anzahl der aufgestellten Bedingungsgleichungen. Die Lösung dieser Ausgleichsaufgabe basiert ebenfalls auf dem Schätzprinzip der Methode der kleinsten Quadrate. Diese Minimumsaufgabe mit den linearisierten funktionalen Beziehungen als Nebenbedingungen kann über die Methode von LAGRANGE gelöst werden. Für die unbestimmten Multiplikatoren p_i wird für jede Bedingungsgleichung eine Korrelate $2k_i$ eingeführt, die insgesamt im Korrelatenvektor k zusammengefasst werden. So ergibt sich die erweiterte Minimumsaufgabe zu

$$\Omega = v^T \cdot P \cdot v + 2k^T \cdot (B \cdot v + A \cdot \hat{x} + w), \quad (2-17)$$

die über die Normalgleichungen

$$\begin{pmatrix} k \\ \hat{x} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} B \cdot Q_{LL} \cdot B^T & A \\ A^T & 0 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} w \\ 0 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2-18)$$

gelöst werden kann. Die Formeln zur Bestimmung der Matrizen Q_{11} , Q_{12} , Q_{21} und Q_{22} sollen hier im Detail nicht aufgeführt werden, können aber in [NIEMEIER, 2002 – S. 157] nachgelesen werden. Durch Lösung der Normalgleichung kann der Korrelatenvektor $k = -Q_{11} \cdot w$ und der Unbekanntenvektor $\hat{x} = -Q_{21} \cdot w$ berechnet werden. Über $w = B \cdot I$ lassen sich hieraus die Verbesserungen $v = -Q_{LL} \cdot B^T \cdot Q_{11} \cdot B \cdot I$, die ausgeglichenen Beobachtungen $\hat{I} = (I - Q_{LL} \cdot B^T \cdot Q_{11} \cdot B) \cdot I$ und die Unbekannten $\hat{x} = -Q_{21} \cdot B \cdot I$ als Funktion der Beobachtungen I ausdrücken. Der Schätzwert für den Varianzfaktor s_0^2 kann mit den Freiheitsgraden $f = b - u$ über

$$s_0^2 = - \frac{k^T \cdot (w + A \cdot \hat{x})}{f} \quad (2-19)$$

bestimmt werden. Für die Formeln der Kofaktormatrizen Q_{vv} der Verbesserungen v und der ausgeglichenen Beobachtungen \hat{I} wird auf die Literatur [NIEMEIER, 2002 – S. 159] verwiesen.

2.3.3 Beurteilung der Ausgleichungsansätze

Sowohl das Genauigkeitsniveau der Messgrößen, als auch die Gültigkeit des funktionalen Modells lassen sich über den Schätzwert s_0^2 für den Varianzfaktor σ_0^2 ableiten. Er bildet ein Maß für die Genauigkeit der beobachteten Größen, wenn das funktionale Modell und die Kofaktormatrix korrekt aufgestellt sind. Für einen aussagekräftigen und zuverlässigen Schätzwert muss zusätzlich die Anzahl der Freiheitsgrade f hinreichend groß sein.

Des Weiteren kann über den geschätzten Varianzfaktor s_0^2 eine Aussage über die Gültigkeit des gewählten funktionalen Zusammenhangs getroffen werden. Hierzu dient der Globaltest der Ausgleichung, der einen statistisch strengen Test beschreibt, mit dem geprüft wird, ob die a priori Standardabweichung σ_0 mit dem a posteriori Schätzwert s_0 im Rahmen der Wahrscheinlichkeit übereinstimmt. Bei korrektem und vollständigem Ausgleichungsansatz ergibt sich der Erwartungswert μ des Beobachtungsvektors I zu $E(I) = A \cdot x = \mu$. Unter der Nullhypothese $H_0: E(I) = A \cdot x$ wird folgende Wahrscheinlichkeitsaussage aufgestellt:

$$P \left\{ \frac{\Omega}{\sigma_0^2} = \frac{v^T \cdot v}{\sigma_0^2} = \frac{f \cdot s_0^2}{\sigma_0^2} > \chi_{f, 1-\alpha}^2 \mid H_0 \right\} = \alpha. \quad (2-20)$$

Ist nun der empirisch ermittelte Quotient Ω/σ_0^2 größer als das entsprechende Quantil der χ^2 -Verteilung, ist die Nullhypothese H_0 mit dem Signifikanzniveau $1 - \alpha$ zu verwerfen. In der Praxis wird die Irrtumswahrscheinlichkeit α häufig mit 5 % angegeben. Konnte durch den Test eine signifikante Abweichung zwischen Schätzwert s_0^2 und theoretischem Wert σ_0^2 nachgewiesen werden, muss der gewählte Ausgleichungsansatz kritisch hinterfragt und gegebenenfalls optimiert werden. Hierzu zählen die Stellen, bei denen der Modellcharakter der funktionalen Beziehungen zum Tragen kommt, nämlich die Wahl des theoretischen Varianzfaktors σ_0^2 und die Festlegung vom funktionalen und stochastischen Modell.

2.3.4 Qualitätsmaße

Die Qualitätsbeurteilung von ausgeglichenen Parametern und Beobachtungen ist bei jedem Ausgleichsproblem von großem Interesse. Der Begriff Qualität lässt sich in diesem Zusammenhang in die beiden Kategorien Genauigkeit und Zuverlässigkeit unterteilen. Die Genauigkeit liefert Informationen über die Präzision der Parameterbestimmung und kann aus der Kofaktormatrix Q_{xx} der Parameter abgeleitet werden. Eine objektive Aussage über die im Ausgleichsmodell enthaltenen Kontrollmöglichkeiten der Beobachtungen und deren Auswirkungen auf die Parameter kann über die Zuverlässigkeitsmaße aus der Kofaktormatrix Q_{vv} der Verbesserungen getroffen werden.

Bei Vorliegen eines verlässlichen Schätzwertes s_0^2 für den Varianzfaktor können als gebräuchliches Maß für die Genauigkeit bei der Punktbestimmung die Standardabweichungen in die einzelnen Koordinatenrichtungen über

$$\begin{aligned} s_{X_i} &= s_0 \cdot \sqrt{q_{XX_i}} \\ s_{Y_i} &= s_0 \cdot \sqrt{q_{YY_i}} \\ s_{Z_i} &= s_0 \cdot \sqrt{q_{ZZ_i}} \end{aligned} \quad (2-21)$$

angegeben werden. Der mittlere Punktfehler lässt sich nach HELMERT über die Spur $s_i = s_0 \cdot \sqrt{sp(Q_{ii})}$ der für jeden Punkt gebildeten Submatrix Q_{ii} der Kofaktormatrix Q_{xx} bestimmen. Ebenfalls weit verbreitet ist die Definition von geometrisch anschaulichen Genauigkeitsbereichen in Form von Fehler- oder Konfidenzellipsen bzw. -ellipsoiden. Diese beschreiben einen Bereich um die geschätzte Punktlage \hat{X}_i in dem die wahre Punktlage \tilde{X}_i mit einer vorzugebenden Wahrscheinlichkeit $1 - \alpha$ enthalten ist. Die Parameter für die Konfidenzellipsen lassen sich, wie hier beispielhaft in der XY -Ebene, über

$$\begin{aligned} w_i^2 &= (q_{XX_i} - q_{YY_i})^2 + 4 \cdot q_{XY_i}^2 \\ \bar{A}_{K_i}^2 &= F_{2, f_2, 1-\alpha} \cdot s_0^2 \cdot (q_{XX_i} + q_{YY_i} + w_i) \\ \bar{B}_{K_i}^2 &= F_{2, f_2, 1-\alpha} \cdot s_0^2 \cdot (q_{XX_i} + q_{YY_i} - w_i) \\ \tan 2\theta_{K_i} &= 2 \cdot \frac{q_{XY_i}}{q_{XX_i} - q_{YY_i}} \end{aligned} \quad (2-22)$$

in den einzelnen Koordinatenebenen berechnen. \bar{A}_K^2 beschreibt die große Halbachse, \bar{B}_K^2 die kleine Halbachse, θ_K den Richtungswinkel und $F_{2, f_2, 1-\alpha}$ das jeweilige Quantil der F -Verteilung. Der erste Freiheitsgrad definiert hierbei die Dimension und ergibt sich für Ellipsen zu zwei, während der zweite Freiheitsgrad f_2 die Anzahl der überschüssigen Beobachtungen bei der Schätzung von s_0^2 kennzeichnet. Die Formeln (2-22) gelten nach Ersetzen des Quantils der F -Verteilung durch das entsprechende Quantil der χ^2 -Verteilung und nach Austausch von s_0^2 durch σ_0^2 auch dann, wenn kein Schätzwert für den Varianzfaktor vorliegt.

Für die Bestimmung des Konfidenzellipsoids muss eine Spektralzerlegung der Submatrix Q_{ii}

$$Q_{ii} = S_i \cdot D_i \cdot S_i^T = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} s_1^T \\ s_2^T \\ s_3^T \end{pmatrix} \quad (2-23)$$

in Eigenwerte λ_j und Eigenvektoren s_j erfolgen. Die Eigenvektoren geben hierbei die Richtung der Halbachsen des Konfidenzellipsoids an, die Eigenwerte beschreiben mit dem Quantil der χ^2 -Verteilung über

$$A_j = \sqrt{\lambda_j \cdot \chi_{3,1-\alpha}^2} \quad (2-24)$$

ihre Länge. Das so definierte Ellipsoid um die geschätzte Punktlage \hat{X}_i enthält in seinem Volumen mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit $1 - \alpha$ die wahre Punktlage \tilde{X}_i [Bild 2-9].

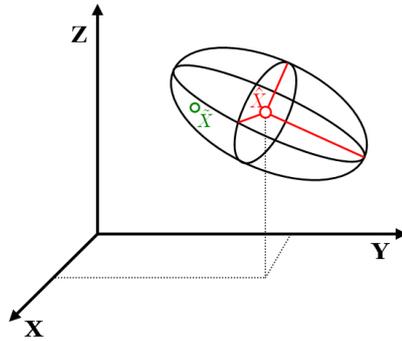


Bild 2-9

Konfidenzellipsoid

Konfidenzellipsoid um die geschätzte Punktlage.

3 MEHRMEDIENPHOTOGRAMMETRIE

Durchläuft ein Abbildungsstrahl auf seinem Weg vom Objekt- zum Bildpunkt mehrere Medien mit unterschiedlichen Brechzahlen, die eine Abweichung vom mathematischen Modell der Zentralperspektive zur Folge haben, wird von Mehrmedienphotogrammetrie gesprochen. Neben diesem geometrischen Einfluss können die Medien im Strahlengang zusätzlich Auswirkungen auf die Bildqualität einer Mehrmedienaufnahme haben.

Die Zusammenhänge der Mehrmedienphotogrammetrie lassen sich anhand von einigen Sonderfällen, die in der Praxis häufig anzutreffen sind, gut nachvollziehen. Die Ansätze basieren auf der Korrektur der veränderten Bildpunktkoordinaten und nicht auf der direkten Parametrisierung der Richtungsänderung der Lichtstrahlen als physikalische Ursache [KOTOWSKI, 1987]. Kann die Wirkung der Lichtbrechung in der Bildebene modelliert werden, ist es möglich die Zentralprojektion als Abbildungsfunktion und die darauf aufbauenden Modellvorstellungen beizubehalten. Da der Begriff Mehrmedienphotogrammetrie keinerlei Einschränkungen bezüglich der Raumlage der lichtbrechenden Flächen und der Aufnahmekameras, sowie der Anzahl der Trennflächen und deren Form beinhaltet, müssen diese Parameter für den Allgemeinfall beliebig kombinierbar sein. Die einzuhaltenden Rahmenbedingungen für einen Sonderfall lassen sich für die Aufnahmegeometrie sowie die optischen und geometrischen Eigenschaften der Trennflächen wie folgt konkretisieren:

AUFNAHMEANORDNUNG

Die Aufnahmen müssen so angeordnet sein, dass eine bekannte gegenseitige Lage zwischen Bildebene und Trennflächen vorausgesetzt werden kann, was bei Parallelität zwischen Sensorebene und Trennfläche zur Folge hat, dass die optische Achse senkrecht auf die Medien Grenzen trifft.

TRENNFLÄCHENEIGENSCHAFTEN

Die Trennflächen müssen einfache Formen aufweisen, die sich so parametrisieren lassen, dass für jeden Oberflächenpunkt die Flächennormale bestimmt werden kann. In den in Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2 beschriebenen Sonderfällen wird eine Ebene als Trennfläche angenommen, da im späteren Versuch ebenfalls von einer Trennebene ausgegangen wird. Des Weiteren muss bei mehreren Trennflächen eines Mediums die gegenseitige Lage der Ein- und Austrittsebene zueinander bekannt sein. Für die optischen Eigenschaften der Medien wird Homogenität und Isotropie vorausgesetzt.

3.1 Parallelität zwischen Bild- und Trennebene

In einem ersten Sonderfall wird der Brechungseinfluss in der Zweimedienphotogrammetrie genauer betrachtet. Handelt es sich bei der Trennfläche um eine Fläche ebener Form, wird in diesem Fall davon ausgegangen, dass die optische Achse senkrecht auf der Trennebene steht

und alle parallel zur optischen Achse verlaufenden Abbildungsstrahlen keine lichtbrechenden Effekte erhalten. Stoßen die Abbildungsstrahlen nicht senkrecht durch die Trennebene, erfahren sie gemäß dem Gesetz von SNELLIUS (2-1) eine Richtungsänderung und können so die geforderte Geradlinigkeit der Abbildungsstrahlen bei der Zentralperspektive nicht mehr einhalten. Diese Modellabweichungen lassen sich auf die Bildebene projizieren und dort als Korrektur der Bildkoordinaten berücksichtigen.

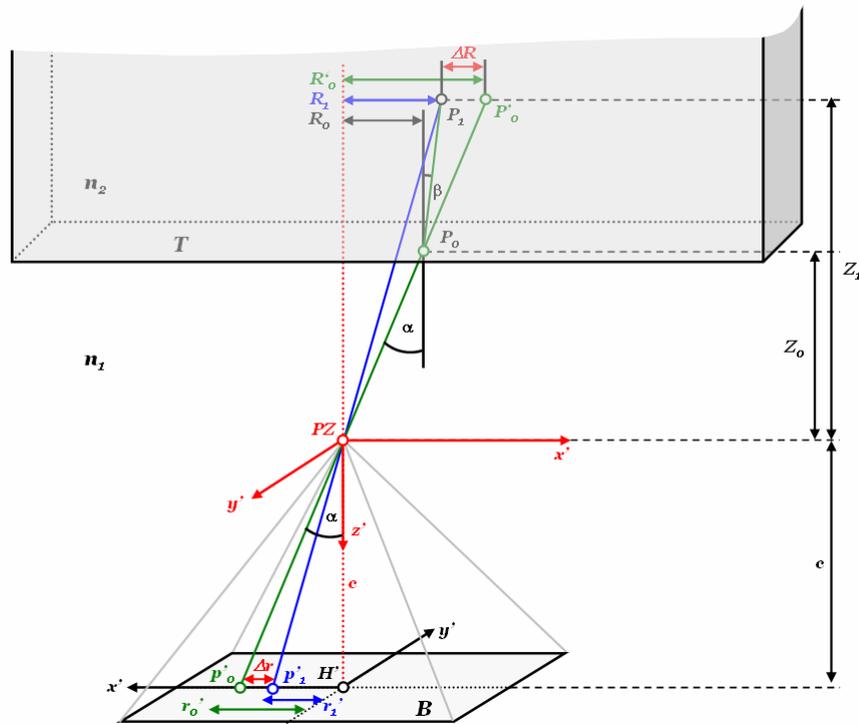


Bild 3-1 **Parallelität zwischen Bild- und Trennebene**
Abbildung des geometrischen Zusammenhangs bei der Strahlbrechung an einer, zur Bildebene parallelen, Trennebene.

Auf Grundlage von [KOTOWSKI, 1987] und [MAAS, 1992] wurde ein Zusammenhang zwischen den lichtbrechenden Effekten der Trennebene und den Korrekturwerten auf der Bildebene entwickelt [Bild 3-1].

Für die folgenden Betrachtungen wurde die Bildebene als ideal ebene Bildfläche B angenommen. Des Weiteren befindet sich das Projektionszentrum PZ im Abstand c über der Bildebene B , dessen Flächennormale durch PZ der optischen Achse entspricht und die Bildebene im Bildhauptpunkt H durchstößt. Im Brechungspunkt P_0 gilt das Brechungsgesetz von SNELLIUS, so dass der Objektpunkt P_i im Bildpunkt p'_o abgebildet wird und Kollinearität zwischen Brechungspunkt P_0 , Projektionszentrum PZ und Bildpunkt p'_o besteht. Ohne Trennfläche im Strahlengang bildet sich der Objektpunkt P_i im, um den radialen Abstand Δr verschobenen Bildpunkt p'_i , ab. Für eine Korrektur der Bildkoordinaten muss dieser radiale Abstand in Abhängigkeit der lichtbrechenden Effekte hergeleitet werden.

Hierfür wird zuerst der Zusammenhang

$$\Delta r = \frac{c}{Z_1} \cdot \Delta R \quad (3-1)$$

aufgestellt, der den radialen Versatz im Objektraum

$$\Delta R = R'_o - R_1 \quad (3-2)$$

über den Abbildungsmaßstab c/Z_1 auf die Bildebene überträgt. Über einfache Dreiecksbeziehungen lassen sich R'_o und R_1 berechnen

$$\begin{aligned} R'_o &= \tan \alpha \cdot Z_1 \\ R_1 &= \tan \alpha \cdot Z_o + \tan \beta \cdot (Z_1 - Z_o) \quad , \quad \text{mit } Z_o < Z_1 \end{aligned} \quad (3-3)$$

und zu

$$\Delta R = \tan \alpha \cdot Z_1 - (\tan \alpha \cdot Z_o + \tan \beta \cdot (Z_1 - Z_o)) \quad (3-4)$$

zusammenfassen. Der Auftreffwinkel α beschreibt den Stufenwinkel zum Winkel zwischen optischer Achse und Abbildungsvektor des radial verschobenen Bildpunktes und lässt sich über

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{r'_o}{c} \right) \quad (3-5)$$

berechnen. Der Einfallswinkel β wird über das Brechungsgesetz nach SNELLIUS (2-1) bestimmt

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \alpha \right) \quad , \quad \text{mit } n_1 < n_2 \quad (3-6)$$

und in Formel (3-4) eingebunden. Es ergibt sich

$$\Delta r = \frac{c}{Z_1} \cdot (\tan \alpha \cdot Z_1 - (\tan \alpha \cdot Z_o + \tan \beta \cdot (Z_1 - Z_o))) \quad (3-7)$$

Formel (3-7) beschreibt so den radialen Fehler auf der Bildebene, der durch ein Medium im Strahlengang hervorgerufen wird und abhängig von der Position r'_o des Bildpunktes auf dem Sensor, der Kamerakonstanten c , den Brechzahlen n_1 und n_2 und den Entfernungen vom Projektionszentrum zur Trennebene (Z_o) und zum Objektpunkt (Z_1) ist.

Die Forderung $n_1 < n_2$ und damit der festgelegte Übergang vom optisch dünneren ins optisch dichtere Medium lässt sich durch Überlegungen zur Totalreflexion der Lichtstrahlen begründen, die in diesem Fall unkritisch wird. Ein Wertebereich für den Auftreffwinkel von $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ kann zugelassen werden. Befindet sich das Aufnahmesystem im optisch dichteren Medium kann ein oberer Grenzwert für den Auftreffwinkel über $\sin \alpha_c = n_2 / n_1$ bestimmt werden, ab dem es zur Totalreflexion kommen würde.

Mit der Forderung $Z_o < Z_1$ soll sichergestellt werden, dass die Trennebene zwischen Projektionszentrum und Objektpunkt liegt.

Bei genauerer Betrachtung von Formel (3-7) zeigt sich, dass Δr in drei Fällen, die sich anschaulich gut erklären lassen, zu Null wird:

$$r'_o = 0:$$

Der gemessene Bildpunkt befindet sich genau im Bildhauptpunkt. Der Abbildungsstrahl läuft also, wie die optische Achse, senkrecht durch die Trennebene, hat einen Auftreffwinkel von 0° und erfährt keine Brechungseinflüsse.

$$n_1 = n_2:$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes ist in beiden Medien gleich. So erfährt der Lichtstrahl keine Richtungsänderung beim Medienübergang.

$Z_0 \geq Z_1$:

Der abgebildete Objektpunkt befindet sich vor oder auf der Trennebene und ist somit frei von den Einflüssen des Mediums hinter der Trennebene.

In Bild 3-2 sind für verschiedene Brechzahlen n_2 die radialen Abweichungen in der Bildebene bei Auftreffwinkeln zwischen 0° und 50° dargestellt. Die Distanzen zwischen Projektionszentrum, Trennebene und Objektpunkt, sowie die Dicke der planparallelen Platte und die innere Orientierung der Kamera entsprechen den Größenordnungen im späteren Versuchsaufbau.

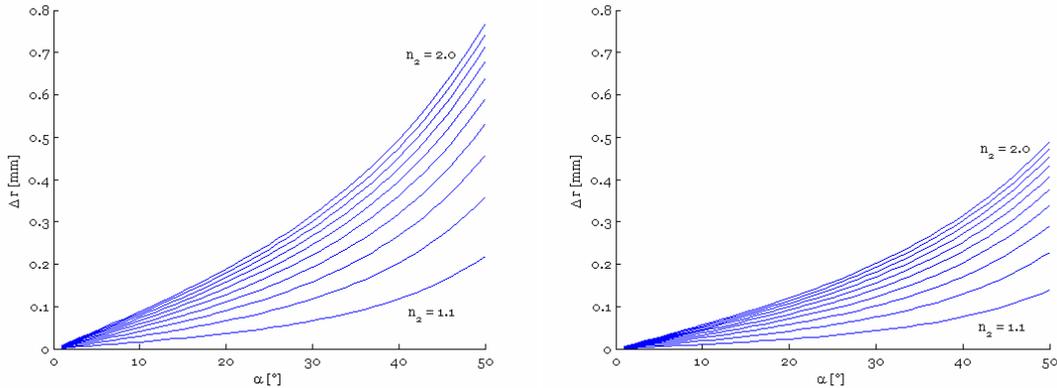


Bild 3-2

Brechungseinflüsse bei unterschiedlichen Brechzahlen

Darstellung der radialen Abweichung Δr auf der Bildebene für unterschiedliche Auftreffwinkel α und Brechzahlen n_2 . Links: Parallele Trennebene Zweimedienphotogrammetrie, Rechts: Planparallele Trennebene Mehrmedienphotogrammetrie; Distanzen zwischen Projektionszentrum, Trennebene und Objektpunkt wie im späteren Versuchsaufbau.

Die Berechnung des Brechungseinflusses einer planparallelen Platte im Strahlengang folgt in Kapitel 3.2. Durch den dort hergeleiteten Zusammenhang wird deutlich, warum der Brechungseinfluss geringer ist als bei einer einfachen Trennebene.

3.2 Parallelität zwischen Bild- und planparalleler Trennebene

Wird die Trennebene der Zweimedienphotogrammetrie durch eine planparallele Platte im Strahlengang ersetzt, erfahren die Lichtstrahlen mit dem Auftreffwinkel α eine Brechung an der unteren Seite der Platte gemäß Kapitel 3.1. Der unter dem Einfallswinkel β gebrochene Lichtstrahl bewegt sich geradlinig bis zur zweiten Mediengrenze und tritt, unter Brechung von der Flächennormalen weg, vom optisch dichteren zurück ins optisch dünnere Medium. Der austretende Strahl erhält durch die zweite Brechung seine ursprüngliche Orientierung zurück und liegt zum einfallenden Strahl parallel versetzt [Bild 3-3].

Für die Berechnung des radialen Fehlers muss der Zusammenhang zur Bestimmung von R_1 aus Formel (3-3) zu

$$R_1 = \tan \alpha \cdot Z_0 + \tan \beta \cdot d + \tan \alpha \cdot (Z_1 - (Z_0 + d)) \quad , \quad \text{mit } (Z_0 + d) < Z_1 \quad (3-8)$$

angepasst werden. Die Forderung $(Z_0 + d) < Z_1$ beschreibt, dass der beobachtete Punkt jenseits der planparallelen Platte liegen soll. Da der Brechungseinfluss des Mediums, ausgedrückt durch

den Winkel β , nur über die Dicke d der Platte Auswirkungen auf den radialen Abstand R_I hat, berechnet sich für gleich große Z_I ein größerer Abstand R_I als über den Zusammenhang (3-3). So ergibt sich für den Einfluss einer planparallelen Platte im Strahlengang ein geringerer radialer Versatz auf der Bildebene

$$\Delta r = \frac{c}{Z_1} \cdot \left(\tan \alpha \cdot Z_1 - \left(\tan \alpha \cdot Z_0 + \tan \beta \cdot d + \tan \alpha \cdot (Z_1 - (Z_0 + d)) \right) \right) \quad (3-9)$$

als bei den Betrachtungen in Kapitel 3.1. Für den Sonderfall, dass d zu Null wird, wird auch der radiale Fehler Δr über (3-9) zu Null, da sich R_I und R'_o jeweils aus $\tan \alpha \cdot Z_1$ ergeben. Des Weiteren gelten hier ebenfalls die drei in Kapitel 3.1 aufgeführten Fälle, für die der radiale Einfluss entfällt.

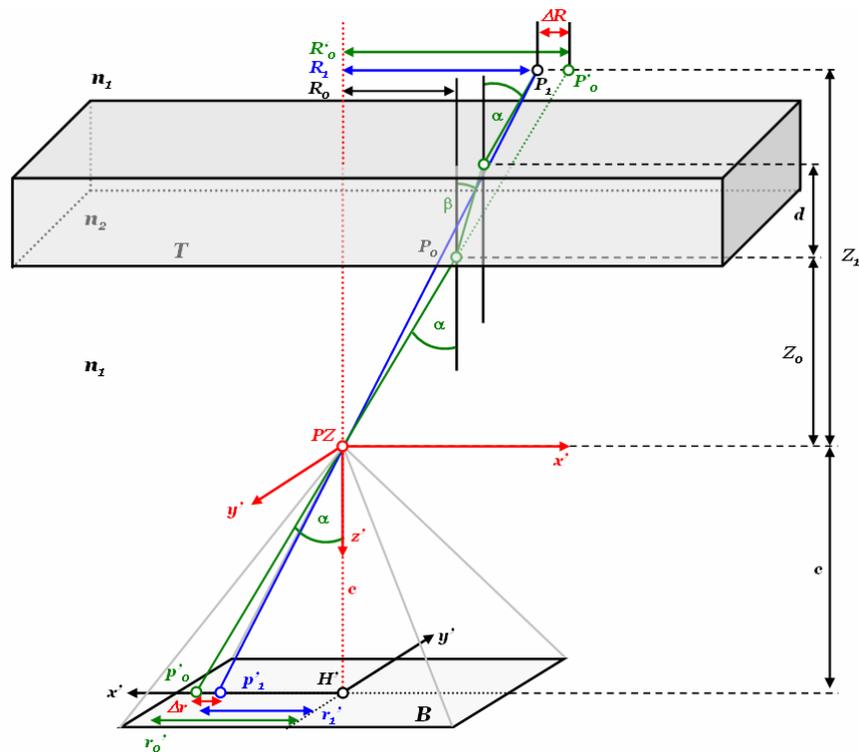


Bild 3-3

Brechung planparallele Platte

Darstellung des geometrischen Zusammenhangs bei der Lichtbrechung an einer, zur Bildebene parallelen, planparallelen Platte.

3.3 Bildqualität und Abweichungen vom Modell

Zu den exakt modellierbaren Einflüssen bei Mehrmedienaufnahmen kommen weitere Fehler, die nicht oder nur sehr schwer modellierbar sind und zur Verringerung der Ergebnisqualität führen. Daher sind Informationen über die Auswirkungen auf die Bildqualität oder die leichten Abweichungen vom angesetzten Modell bei der Interpretation von Ergebnissen sehr hilfreich.

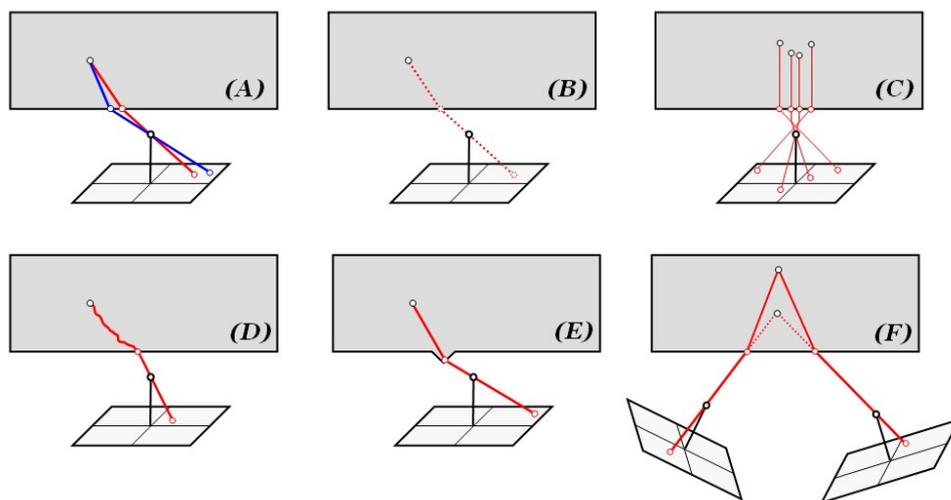


Bild 3-4 **Einflüsse Mehrmedienphotogrammetrie**
 (A) Dispersion, (B) Absorption, (C) Sphärische Aberration, (D) Restinhomogenitäten, (E) Planheit der Mediengrenzen, (F) Aufnahmeconfiguration

(A) DISPERSION:

Luft ist ein Medium mit sehr geringer Dispersion. Die Brechzahl variiert über den gesamten Wellenlängenbereich des Lichtes um nur 0,008 %. Befindet sich z. B. Wasser im Strahlengang kommt es, mit einer Variation von 1,4 %, zu einer deutlich höheren Abweichung der Brechzahl in Abhängigkeit von der Wellenlänge [BACHMANN, 2000]. Im Bild spiegelt sich diese hohe Variation bei schwarz – weiß Sensoren als Unschärfe, bei Farbsensoren als Farbsäume an den abgebildeten Objekten, wider [MAAS, 1992] [Bild 3-4].

(B) ABSORPTION:

Durch eine eventuelle Absorption des Lichtes im Medium kommt es auf der Bildebene zur Kontrastminderung, da weniger Energie auf den Sensor gelangt [MAAS, 1992] [Bild 3-4].

(C) ABERRATION:

Objektive werden bezüglich Aberration für den Einsatz in nur einem Medium, in der Regel für Luft, korrigiert. Durchlaufen die Abbildungsstrahlen bei Mehrmedienaufnahmen ein komplexeres Gesamtsystem, z. B. Luft – Glas – Luft – Objektiv, ist dies bezüglich Aberration nicht mehr minimiert und es kommt zur Verschlechterung der Bildqualität, ähnlich wie es bei einem dejustierten Objektiv der Fall wäre [MAAS, 1992] [Bild 3-4].

(D) RESTINHOMOGENITÄTEN:

Wird bei der Modellierung der Mehrmediengeometrie Homogenität und Isotropie der im Strahlengang befindlichen Materialien vorausgesetzt, führen kleine Restinhomogenitäten der Brechzahl, hervorgerufen durch z. B. lokale Druck- oder Temperaturschwankungen, zu nicht geradlinigen Abbildungsstrahlen und somit zu Abweichungen vom verwendeten Modell [MAAS, 1992] [Bild 3-4].

(E) PLANHEIT DER MEDIENGRENZEN:

Neben Homogenität und Isotropie wird bei der Modellierung ebenfalls die Planheit der Mediengrenzen angenommen. Abweichungen von der Planheit führen zu fehlerhaft berechneten Ein-

fallswinkeln β , die eine verfälschte Bestimmung des radialen Versatzes der Bildpunkte zur Folge haben [Bild 3-4].

(F) AUFNAHMEKONFIGURATION:

Die Aufnahmeconfiguration kann durch ein Medium im Strahlengang ebenfalls beeinflusst werden. So kommt es z. B. beim Übergang in ein optisch dichteres Medium zu einer Verschlechterung des Strahlenschnitts, da die Strahlen zur Flächennormalen hin gebrochen werden, was einer Verkleinerung des Konvergenzwinkels gleich kommt und eine höhere Ungenauigkeit in der Tiefenkoordinate zur Folge hat [Bild 3-4]. Bei der Lichtbrechung an einer planparallelen Platte, bleibt der ursprüngliche Konvergenzwinkel erhalten, da die Abbildungsstrahlen zwar parallel verschoben werden, ihre relative Orientierung zueinander jedoch erhalten bleibt.

4 VERFAHRESENTWICKLUNG

Die Entwicklung eines neuen Verfahrens für die dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite erfordert neben den benötigten Auswertemethoden eine optimale Integration in die vorhandene Infrastruktur aus Soft- und Hardwaresystemen, die bereits für die Auswertung von Crashversuchen eingesetzt werden. Neben einem Passpunktfeld im definierten Hallenkoordinatensystem steht die Software FalCon eXtra für die dreidimensionale Filmauswertung zur Verfügung. In ihr sind, unter anderem, Bildverarbeitungsalgorithmen für die Bildkoordinatenmessung der Messmarken und photogrammetrische Auswertemethoden wie der räumliche Rückwärts- und der räumliche Vorwärtsschnitt [Kapitel 2.2.5 und 2.2.6] implementiert. Des Weiteren bilden synchrone Highspeed Kameras [Kapitel 5.1.1] und eine leistungsstarke Beleuchtungsanlage [Kapitel 5.1.2] die Grundlage für den Prozess der Bildaufzeichnung.

Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben wird im Folgenden ein Verfahren vorgestellt, welches eine dreidimensionale Auswertung der Fahrzeugunterseite ermöglicht und sich dabei in die Durchführung der Versuchsvorbereitung, des eigentlichen Crashversuches und der abschließenden Versuchsauswertung integrieren lässt.

4.1 Problemstellung bei der Auswertung der Fahrzeugunterseite

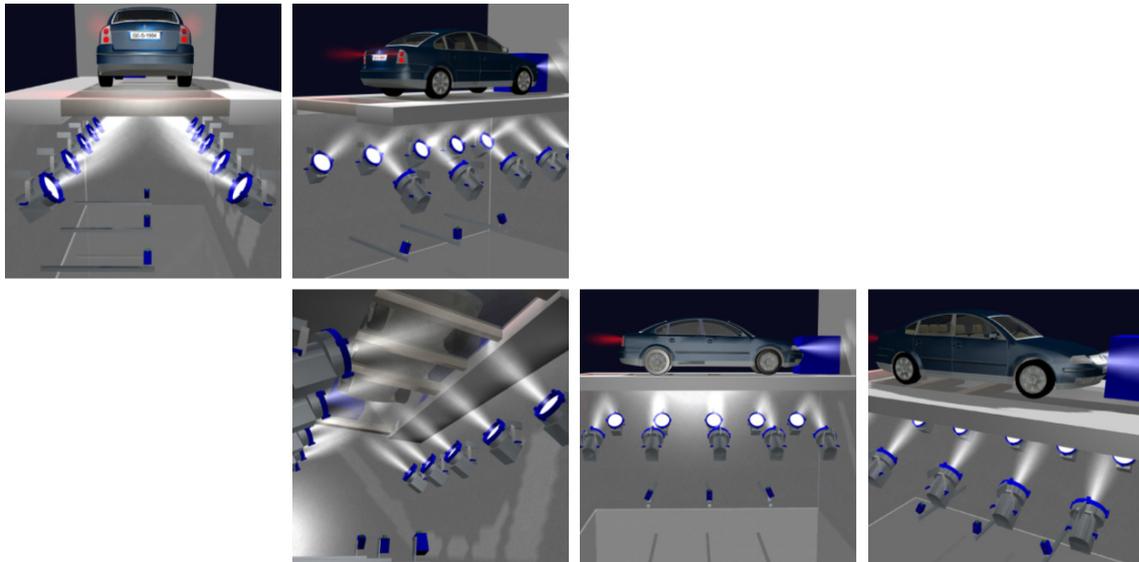


Bild 4-1

Situation in der Versuchshalle

Abstrahierte Darstellung der Fotogrube in der Versuchshalle. 3D Modellierung der Szene mit dem 3D-CAD-System PYTHA.

Für die Auswertung der Fahrzeugunterseite müssen die relevanten Punkte, wie z. B. Punkte auf dem Aggregat, durch Messmarken signalisiert und während des Crashversuches aus der Fotogrube beobachtet werden [Bild 4-1]. Als Fotogrubenabdeckung dient eine Scheibe aus Acrylglas, durch die die Unterseite des Fahrzeugs während des Crashversuches mit synchronen Highspeed Kameras mit 1000 Hz erfasst werden kann. Für eine dreidimensionale Auswertung der Messpunkte an der Fahrzeugunterseite werden zum einen die äußeren Orientierungen der in der Fotogrube eingesetzten Kameras und zum anderen die hochgenauen Bildkoordinaten der beobachteten Messmarken für jeden Zeitschritt der aufgenommenen Bildsequenz benötigt. Da die Kameras keine Passpunkte des oberhalb der Fotogrube realisierten Passpunktfeldes im Hallenkoordinatensystem aufnehmen können, müssen sie entweder direkt im Fahrzeugkoordinatensystem oder in einem neuen Passpunktfeld in der Fotogrube orientiert werden. Des Weiteren liefert die Auswertesoftware Werte für die Bildkoordinaten, die durch den Brechungseinfluss der Acrylglasplatte fehlerbehaftet sind. Die realen Abbildungsvorgänge können so nicht mehr durch das implementierte Modell der Zentralperspektive beschrieben werden. Ohne Berücksichtigung des aus der Scheibe resultierenden Fehlers können die verwendeten Algorithmen für die dreidimensionale Punktbestimmung nur unter erheblichen Genauigkeitsverlusten genutzt werden.

KOORDINATENSYSTEM – BESTIMMUNG DER ÄUßEREN ORIENTIERUNG

Die Definition eines Koordinatensystems und die hochgenaue Bestimmung von Passpunktkoordinaten in diesem System sind bei der Versuchsvorbereitung von entscheidender Bedeutung. Um den Bezug der Auswerteergebnisse zum Fahrzeugkoordinatensystem herstellen zu können, werden die signalisierten Messpunkte am Fahrzeug während der Versuchsvorbereitung mit einem photogrammetrischen Messverfahren hochgenau im Fahrzeugkoordinatensystem vermessen. Bei der Versuchsdurchführung ist der Zeitpunkt für den ersten Kontakt des Fahrzeugs mit dem Crashelement genau definiert, so dass über diesen so genannten Referenzzeitpunkt t_0 ein Bezug zum Fahrzeugkoordinatensystem hergestellt werden kann. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Deformationen an der Fahrzeugstruktur auftreten, können die signalisierten Messmarken als Passpunktfeld im Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 angesehen werden. Durch dieses Passpunktfeld ist eine direkte Auswertung der Versuchsfilme im Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 möglich. Des Weiteren kann ein Bezug zwischen Ergebnissen aus anderen Koordinatensystemen mit dem Fahrzeugkoordinatensystem über eine räumliche Koordinatentransformation zum Referenzzeitpunkt t_0 hergestellt werden. Da sämtliche Versuchsergebnisse für eine genaue Analyse im Fahrzeugkoordinatensystem benötigt werden, ist der Bezug auf das Passpunktfeld zum Zeitpunkt t_0 entweder für die direkte Auswertung in diesem System oder für eine anschließende räumliche Koordinatentransformation unumgänglich.

Dem Vorteil, die Auswertung direkt im Fahrzeugkoordinatensystem durchzuführen und so eine erforderliche Koordinatentransformation am Ende der Auswerteprozedur umgehen zu können, stehen wesentliche Nachteile gegenüber. So können die Passpunkte an der Fahrzeugunterseite weder als stabil, noch als räumlich verteilt angesehen werden, welches zwei grundlegende Forderungen an Passpunkte sind, über die eine hochgenaue äußere Orientierung von Kameras bestimmt werden soll. Durch den Aufbau der Bauteile an der Fahrzeugunterseite können mögliche Messpunkte lediglich in einer Ebene signalisiert werden. Fahrzeugpunkte, die dem Passpunktfeld Tiefeninformationen liefern könnten, werden entweder durch Bauteile wie dem Auspuffrohr verdeckt oder sind durch unzureichende Beleuchtung und Schattenwurf nicht

messbar. Die Bewegungen des Fahrzeugs bei der Beschleunigung für den Crashversuch haben zur Folge, dass Passpunkte an manchen Bauteilen der Fahrzeugunterseite nicht stabil sind. Ein weiterer wesentlicher Nachteil ist, dass von manchen Kamerapositionen zum Referenzzeitpunkt t_0 nicht genügend Passpunkte für die Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung beobachtet werden können. Die Aufnahmen dieser Kameras können so für die gesamte Auswertung des Crashversuches nicht mehr verwendet werden.

ACRYLGLASPLATTE – EINFLUSS AUF DIE BILDKOORDINATEN

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Variationen der Messpunkte im Objektraum kommen die Fehlerinflüsse der Acrylglasabdeckung, die sich auf die Bildkoordinaten der jeweils gemessenen Marken auswirken. Die fehlerbehafteten Bildkoordinaten der Passpunkte stellen eine weitere Fehlerquelle bei der Berechnung der äußeren Orientierungen der Kameras dar. Da es sich hierbei um einen systematischen Fehler handelt, könnte dieser, im Gegensatz zu den vorher beschriebenen mechanischen und unsystematischen Fehlerquellen, im Auswerteprozess korrigiert werden. Neben den Auswirkungen auf die Kamerapositionierung treten auch bei der dreidimensionalen Punktbestimmung systematische Fehler auf, die durch Modellierung des Acrylglaseinflusses auf die Bildkoordinaten behoben werden müssen.

AUSWERTUNG ERSTER TESTAUFNAHMEN

Erste Testaufnahmen und -auswertungen zeigen, dass eine Bestimmung der äußeren Orientierung der Kameras bezogen auf das Fahrzeugkoordinatensystem keine verwendbaren Ergebnisse liefert. Die Standardabweichungen für die einzelnen Parameter der äußeren Orientierung ergeben sich beispielhaft für die Positionierung einer Kamera zu

s_x [mm]	s_y [mm]	s_z [mm]	s_ω [°]	s_φ [°]	s_κ [°]
19,6	27,8	3,6	0,505 (28,2 mm)	0,356 (19,9 mm)	0,067 (3,7 mm)

Tabelle 4-1 **Standardabweichungen der äußeren Orientierung im Fahrzeugsystem**

Ergebnisse erster Testaufnahmen. Dargestellt sind die Standardabweichungen der Parameter der äußeren Orientierung bezogen auf das Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 . Für die Standardabweichungen der Orientierungswinkel sind zusätzlich die Auswirkungen der Ungenauigkeiten im Objektraum, berechnet über die Bogenformel $b/r = \alpha/\rho$ bei einem Aufnahmeabstand von 3.2 m, angegeben.

Eine Auswertung der Bildsequenzen mit den so berechneten Orientierungsparametern und den unkorrigierten Bildkoordinaten führt zu einem systematischen Genauigkeitsverlust der einzelnen Trajektorienpunkte [Bild 4-2].

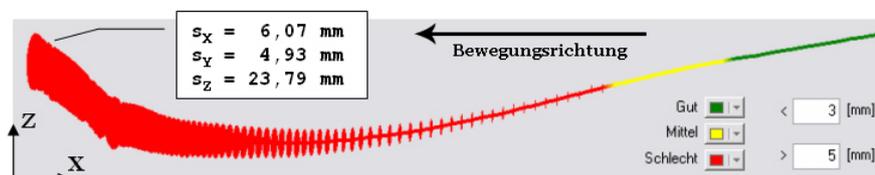


Bild 4-2 **Beispiel für fehlerbehaftete dreidimensionale Trajektorie**

Darstellung der fehlerbehafteten dreidimensionalen Trajektorie eines Messpunktes an der Fahrzeugunterseite. Die dreidimensionale Punktbestimmung ist über die, im Fahrzeugkoordinatensystem orientierten Kameras und ohne Berücksichtigung des Fehlereinflusses der Acrylglasplatte durchgeführt worden.

Die berechneten Messpunkte in Bild 4-2 sind abhängig vom mittleren Punktfehler [Kapitel 2.3.4] grün, gelb oder rot eingefärbt. Zusätzlich erhalten die Punkte in der Darstellung eine Skalierung für die einzelnen Koordinatenachsen, die proportional zur Standardabweichung in der jeweiligen Koordinatenrichtung ist. Des Weiteren sind die Standardabweichungen für einen Messpunkt am Ende der Trajektorie zum Zeitpunkt $t = 150$ ms angegeben.

Die systematische Verschlechterung der Genauigkeit lässt sich über die ebenfalls systematischen Einflüsse der Acrylglasplatte auf die Bildkoordinaten erläutern. Zum Zeitpunkt t_0 werden die äußeren Orientierungen über die signalisierten Punkte am Fahrzeug berechnet. Anschließend werden die dreidimensionalen Koordinaten von genau diesen Messmarken über einen räumlichen Vorwärtsschnitt mit den systematisch fehlerhaften Kamerapositionen bestimmt. Da die Abbildungsgeometrien zum gleichen Zeitpunkt für die Berechnung vom räumlichen Rückwärtsschnitt und räumlichen Vorwärtsschnitt von der Acrylglasplatte identisch beeinflusst werden, kann zum Zeitpunkt t_0 eine dreidimensionale Koordinate mit einer hohen Genauigkeit berechnet werden. Im Laufe der Bildsequenz bewegt sich nun jede Messmarke von ihrer ursprünglichen Position zum Zeitpunkt t_0 fort, so dass die Abbildungsgeometrien für die einzelnen Punkte zwischen dem Zeitpunkt der Kamerapositionierung und dem Zeitpunkt der Koordinatenbestimmung nicht mehr übereinstimmen. Bild 4-3 zeigt beispielhaft die unterschiedlichen Auftreffwinkel der Abbildungsstrahlen über den Zeitraum der aufgezeichneten Bildsequenz von einem Punkt auf dem Aggregat und einem Fahrzeugpunkt auf dem Längsträger für die drei im Versuch eingesetzten Kameras U1, U2 und U3 [Kapitel 4.2.4].

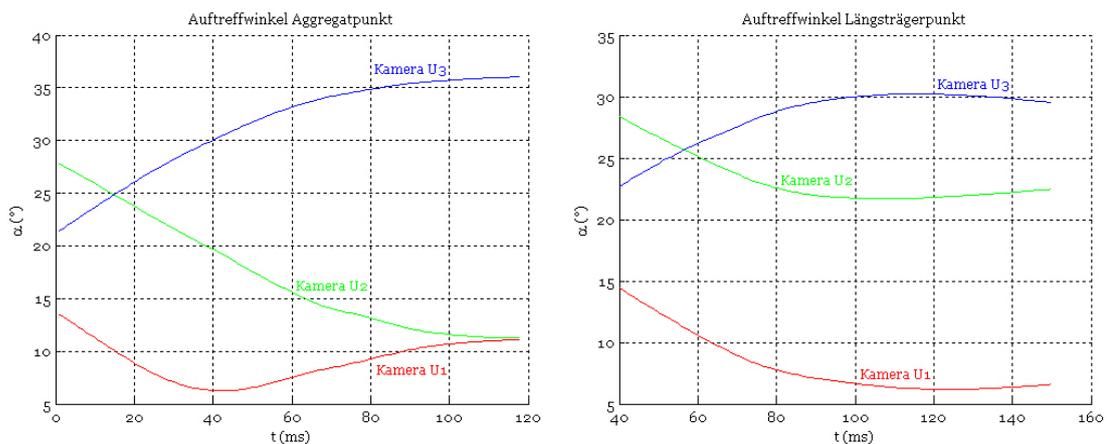


Bild 4-3 **Auftreffwinkel der Abbildungsstrahlen**
 Darstellung unterschiedlicher Auftreffwinkel für einen Punkt über die beobachtete Bildsequenzen der Kameras U1, U2 und U3. Links: Punkt auf dem Aggregat; Rechts: Punkt auf dem Längsträger.

Die Darstellungen zeigen deutlich, dass für jeden Zeitschritt der Aufnahme die Auftreffwinkel der Abbildungsstrahlen, der daraus resultierende Einfluss der Acrylglasplatte und die so entstehende Abbildungsgeometrie unterschiedlich sind. Da sich die Fahrzeugpunkte über die Bildsequenz hauptsächlich in eine Richtung bewegen, wird der Unterschied zwischen der Abbildungsgeometrie zum Zeitpunkt t_0 und den darauf folgenden Abbildungsgeometrien für die Kameras U2 und U3 in der Regel systematisch größer. Durch die Vorwärtsschnittberechnung mit mindestens einer dieser Kameras lässt sich die signifikante und systematische Verschlechterung der Genauigkeit, wie sie in Bild 4-2 beispielhaft für eine Trajektorie dargestellt ist, erklären.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Testaufnahmen [Tabelle 4-1 und Bild 4-2] deutlich, dass zum einen die Realisierung eines Passpunktfeldes in der Fotogrube für die hochgenaue Kamerapositionierung [Kapitel 4.2] und zum anderen eine Berücksichtigung des Brechungseinflusses der Acrylglasplatte auf die Bildkoordinaten für jeden Zeitschritt der aufgezeichneten Bildsequenz [Kapitel 4.3 und 4.4] unumgänglich ist.

4.2 Aufbau eines Passpunktfeldes in der Fotogrube

4.2.1 Planung

Das für die Bereitstellung genauer und zuverlässiger Kamerapositionen notwendige Passpunktfeld bedarf einiger theoretischer Vorüberlegungen, bevor es in der Fotogrube konstruiert werden kann. Neben der Planung der Passpunktverteilung sind die Einschränkungen durch die vorhandenen Rahmenbedingungen in der Fotogrube und im Versuchsablauf genau zu analysieren. So muss zusätzlich zur allgemein geforderten Langzeitstabilität und räumlichen Verteilung der Passpunkte berücksichtigt werden, dass keine versuchsrelevanten Informationen durch die Messmarken der Passpunkte verdeckt werden. Aus diesem Grund dürfen die Passpunkte lediglich im äußersten Randbereich der Fotogrubenabdeckung konstruiert werden. Weiterhin ist zu beachten, dass mehrere verschiedene Crashversuchsarten existieren, bei denen unterschiedliche Kamerastandorte gewählt werden. So muss gewährleistet werden, dass für jede Crashart und für jede eingesetzte Kamera genügend Passinformationen für eine hochgenaue Bestimmung der äußeren Orientierung zur Verfügung steht.

Für die Planung der Passpunkte sind mögliche Positionen für die Abbildungen der Passpunktmessmarken vom Bildraum in den Objektraum projiziert worden. Hierzu wurden Bildkoordinaten an den gewünschten Stellen für die Passpunktabbildungen aus beispielhaften Aufnahmen aus der Fotogrube abgegriffen und über die Kollinearitätsgleichungen in den Objektraum übertragen. Für die Tiefenvariation der Passpunkte sind bei dieser Planung 30 cm angenommen worden. Des Weiteren ist darauf geachtet worden, dass die geplanten Passpunktpositionen nicht alle in einer Linie an dem Rand der Fotogrubenabdeckung liegen, um die mögliche Konstruktion eines gefährlichen Zylinders [LUHMANN, 2000 – S. 249] zu vermeiden. Ausgehend vom Rand der Fotogrubenabdeckung sind die Passpunkte aus diesem Grund um 5 cm in der Lage variiert worden.

Neben den so festgelegten Positionen der Passpunkte ist die benötigte Mindestgröße der einzusetzenden Messmarken für eine zuverlässige und genaue Bestimmung der Markenmitte über den Abbildungsmaßstab berechnet worden. Eine DOT Marke [Kapitel 5.1.2] mit 30 mm Durchmesser wird im Bild – bei Kamerakonstante und Sensorformat der eingesetzten Kameras – ungefähr mit 20 Pixeln abgebildet und ist somit für die Signalisierung der Passpunkte sehr gut geeignet.

4.2.2 Passpunktadapter

Für die Realisierung der geplanten Passpunkte sind Adapter aus *item* Aluminiumprofilen [Bild 4-4] konstruiert worden. Über stabile Schienenführungen, die an der Decke der Fotogrube angebracht worden sind, konnten die Passpunktadapter so befestigt werden, dass sie den geplanten Passpunktlagen entsprechen.

Um die Bestimmung der Kamerapositionen weiter zu stabilisieren, sind auf den umgesetzten Passpunktadaptern weitere Punkte angebracht worden [Bild 4-4]. Hierfür sind Metallplatten auf den Passpunktadaptern befestigt worden, so dass im Gegensatz zu den 16 geplanten Passpunktpositionen (acht auf den Adaptern und acht auf der Acrylglasplatte) 36 Passpunkte in der Fotogrube zur Verfügung stehen. Hintergrund dieser speziellen Anordnung ist, dass weitere Variationen in den sonst sehr systematischen Aufbau des Passpunktfeldes gebracht werden und so eine Optimierung der räumlichen Verteilung der Passpunkte erreicht wird. Neben den zusätzlichen Tiefeninformationen durch die Passpunkte auf den Metallplatten kann die Konstruktion eines gefährlichen Zylinders durch die nun vorliegende Passpunktanordnung ausgeschlossen werden.



Bild 4-4 **Passpunktadapter**
Darstellung der konstruierten Passpunktadapter in der Fotogrube, angebracht an stabilen Schienenführungen ca. 30 cm unterhalb der Passpunkte auf der Acrylglasabdeckung.

Des Weiteren veranschaulicht Bild 4-4 rechts, dass durch die konstruierten Passpunkte keine versuchsrelevanten Informationen verdeckt werden. Die Messmarken befinden sich ausschließlich im äußersten Randbereich der Fotogrubenabdeckung. Die in der Acrylglasplattenmitte zu sehenden Messmarken gehören nicht zum konstruierten Passpunktfeld, sondern sind für die in Kapitel 4.6.2 folgenden Analysen an der Fotogrubenabdeckung angebracht worden.

Durch die Verwendung von *item* Aluminiumprofilen ist eine eventuelle Anpassung des Passpunktfeldes, die vielleicht bei baulichen Veränderungen an der Fotogrube oder der Fotogrubenabdeckung nötig wäre, sehr einfach durchzuführen. Über die Schienenführungen können die Adapter sowohl in Längs- als auch in Tiefenrichtung variiert werden. Bei Bedarf können weitere Aluminiumprofile, zum Beispiel mit einer senkrechten Ausrichtung, an die Adapter montiert werden, um die räumliche Verteilung des Passpunktfeldes weiter zu optimieren.

4.2.3 Fotogrubenkoordinatensystem

Die Bestimmung der Passpunktkoordinaten ist über die Aufnahme eines Bildverbandes und eine anschließende Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung nach Brown [BROWN, 1971]

durchgeführt worden. Hierzu wurde für die Definition des Koordinatensystems und des Systemmaßstabes eine SAE – Kalibriertafel [SAE, 1995] unter der Acrylglasplatte fixiert [Bild 4-5] und aus der Fotogrube ein Halbverband mit 52 Aufnahmen in verschiedenen Höhenlagen aufgenommen.

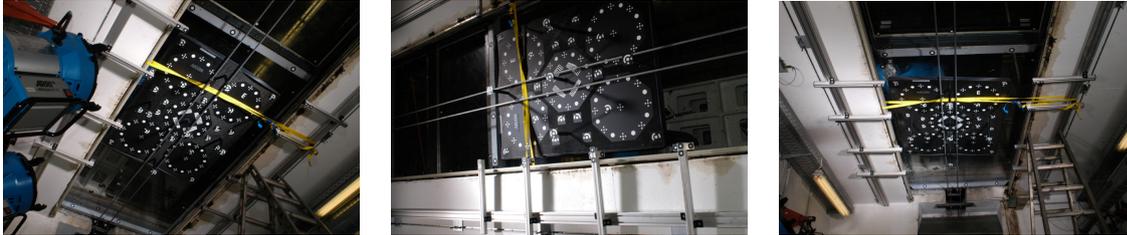


Bild 4-5 **Aufnahmen für die Einmessung des Passpunktfeldes**
Drei beispielhafte Aufnahmen für die photogrammetrische Einmessung des Passpunktfeldes im Fotogrubenkoordinatensystem.

Die stark überbestimmte Lösung der Bündelausgleichung liefert dreidimensionale Koordinaten der 313 Objektpunkte mit einer mittleren inneren Genauigkeit von $s_x = 0,011$ mm, $s_y = 0,011$ mm und $s_z = 0,020$ mm.

Zusätzlich werden die Parameter der äußeren Orientierung für jede Kameraposition und die Parameter für die innere Orientierung der verwendeten Nikon D-100 bestimmt. Die so genannte Simultan- oder Selbstkalibrierung der inneren Orientierung hat zum Vorteil, dass die Parameter exakt für den Zeitpunkt der Objektaufnahme bestimmt werden, so dass bei der Objektauswertung höhere Genauigkeiten, als bei einer im Vorfeld durchgeführten Kalibrierung der Kameras, zu erwarten sind [LUHMANN, 2000 – S. 494].

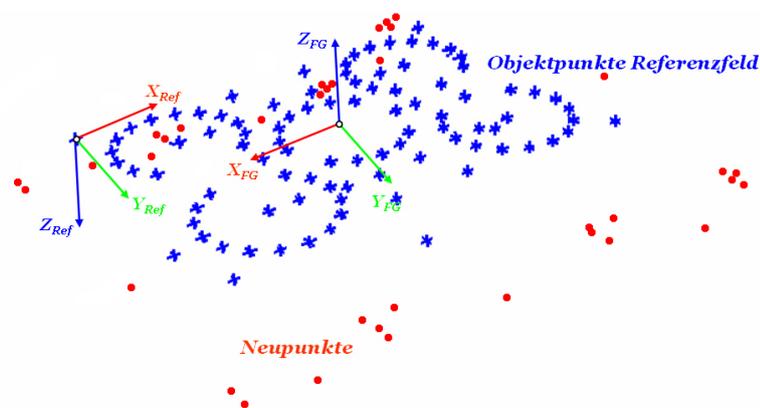


Bild 4-6 **Referenz- und Neupunkte bei der Passpunktvermessung**
Darstellung der Ergebnisse der Bündelausgleichung zur Einmessung der Passpunkte in der Fotogrube. Zusätzlich sind sowohl das Referenzkoordinatensystem der SAE Tafel als auch das Fotogrubenkoordinatensystem visualisiert.

Bild 4-6 visualisiert die ausgeglichenen Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte. In blau sind die Punkte des Referenzfeldes und in rot die neu konstruierten Passpunkte dargestellt. Weiterhin sind das Referenzkoordinatensystem, welches sich aus der Ausrichtung der Kalibriertafel ergibt und das frei definierte Fotogrubenkoordinatensystem dargestellt. Dieses ist so festgelegt, dass es von den Ausrichtungen der Achsen dem Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 entspricht. Die Ergebnisse der Bündelausgleichung liegen im Referenzsystem vor und werden nach der Auswertung über eine räumliche Koordinatentransformation in das

Fotogrubenkoordinatensystem transformiert. Hintergrund dieser Systemfestlegung ist, dass Ergebnisse die nur im Fotogrubenkoordinatensystem vorliegen, einfacher interpretiert werden können, da die Ausrichtung der Koordinatenachsen eine ähnliche ist, wie bei dem standardmäßig verwendeten Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 .

4.2.4 Auswahl optimaler Kamerastandpunkte

Die optimal geeigneten Kamerastandpunkte für den Versuchsaufbau in der Fotogrube können über eine photogrammetrische Aufnahmeplanung bestimmt werden. Ein, im Rahmen dieser Arbeit, mit MATLAB implementiertes Tool ermöglicht hierfür eine Aussage über die erreichbare Genauigkeit der dreidimensionalen Punktbestimmung von bestimmten Kamerakonstellationen. Als Eingabegrößen können für eine beliebige Anzahl von Kameras die inneren und äußeren Orientierungen angegeben werden. Des Weiteren werden die Koordinaten eines Objektpunktes, die Größe eines frei definierbaren Messvolumens, welches um den Objektpunkt aufgespannt wird und die angenommene Genauigkeit der Bildkoordinaten benötigt. Über diese Informationen kann mit einem räumlichen Vorwärtsschnitt [Kapitel 2.2.5] die theoretisch erreichbare Genauigkeit für die Objektpunkte in dem Messvolumen bestimmt werden. Neben der numerischen Ausgabe der Ergebnisse ist eine dreidimensionale graphische Darstellung implementiert, die die einzelnen Kamerastandpunkte sowie die erzielten Objektpunktgenauigkeiten in Form von Konfidenzellipsoiden [Kapitel 2.3.4] visualisiert. So wird eine schnelle und einfache Interpretation der Ergebnisse für die gewählten Aufnahmekonstellationen ermöglicht.

Für die Filmauswertung der Fahrzeugunterseite stehen in der Fotogrube maximal drei High-speed Kameras zur Verfügung. Die Position einer dieser Kameras ist durch die Anforderungen der Versuchingenieure so festgelegt, dass die optische Achse der Kamera ungefähr senkrecht und mittig auf die Fahrzeugunterseite trifft [Bild 4-7 links]. So können lediglich die Positionen der beiden weiteren Kameras variiert werden. Eine zusätzliche Einschränkung ergibt sich hierbei durch die Konstellation der Scheinwerfer für die Ausleuchtung der Fotogrube [Bild 4-7 rechts]. Wie in Bild 4-7 dargestellt wird die Szene von schräg unten beleuchtet. Ein Teil des schräg einfallenden Lichtes wird von der Acrylglasplatte reflektiert, so dass Kamerastandpunkte mit einer ähnlichen Ausrichtung wie die Scheinwerfer ungeeignet sind. Das reflektierte Scheinwerferlicht trifft bei einer solchen Konstellation direkt auf den Sensor und führt für die Filmauswertung zu unbrauchbaren Aufnahmen.

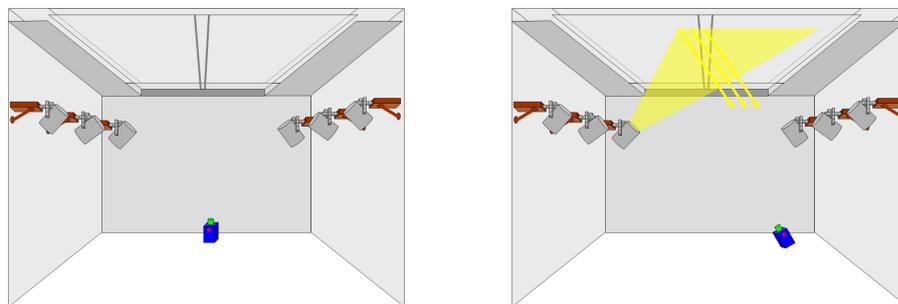


Bild 4-7

Kamerastandpunkte und Beleuchtung in der Fotogrube

Darstellung der Beleuchtungskonstellation in der Fotogrube. Links: Festgelegte Kameraposition der Versuchingenieure; Rechts: kritischer Kamerastandpunkt.

Für die in der Praxis möglichen Kamerastandpunkte können die theoretisch erreichbaren Genauigkeiten für unterschiedliche Kamerakonstellationen mit Hilfe des MATLAB - Programms berechnet und analysiert werden. Für fast sämtliche Kameravariationen sind, bei einer angenommenen Bildkoordinatengenauigkeit von 1/10 Pixel, sowohl für drei als auch nur für zwei Kameras mittlere Punktfehler [Kapitel 2.3.4] deutlich geringer als 3 mm erzielt worden.

Bild 4-8 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für drei mögliche Kamerakonstellationen bei einem simulierten Messvolumen für den Messbereich des Fahrzeugs beim Crashversuch. Das Koordinatensystem in den Darstellungen repräsentiert das Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 . Die Konfidenzellipse sind nach dem mittleren Punktfehler des jeweiligen Objektpunktes eingefärbt, wobei ein mittlerer Punktfehler kleiner als 3 mm grün, ein Fehler zwischen 3 mm und 5 mm gelb und ein Fehler größer als 5 mm rot dargestellt wird. Des Weiteren sind die Standardabweichungen in den einzelnen Koordinatenrichtungen und der mittlere Punktfehler für den Objektpunkt, um den das Messvolumen aufgespannt wird, angegeben.

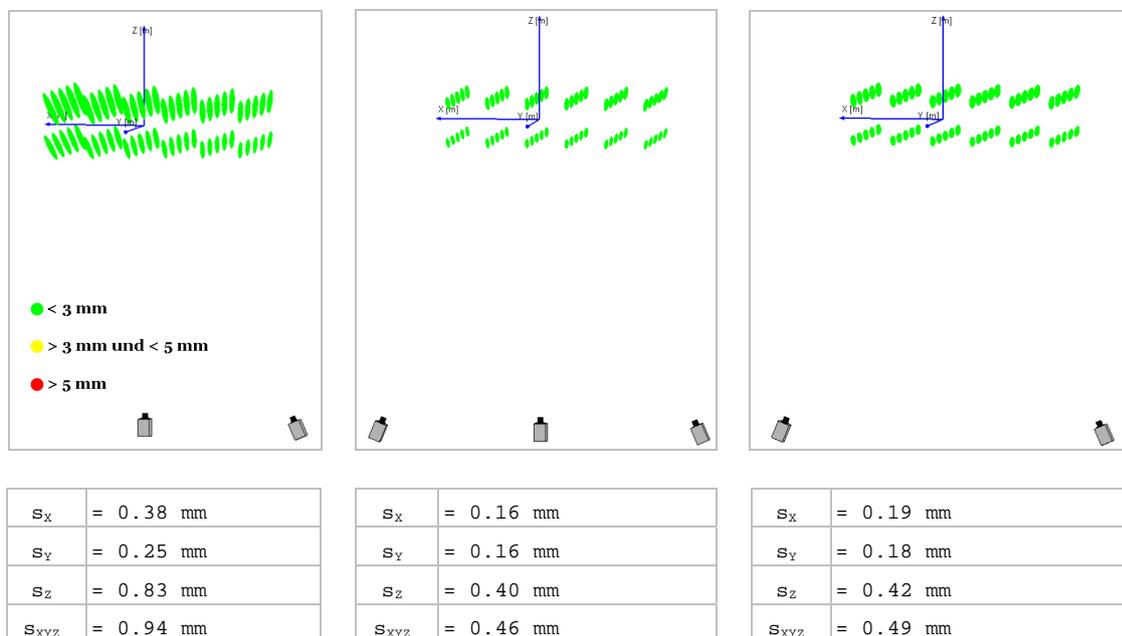


Bild 4-8

Ergebnisse der Aufnahmeplanung

Visualisierung der Ergebnisse der Aufnahmeplanung durch Konfidenzellipse mit einem Signifikanzniveau von 95 %. Zusätzlich sind die numerischen Werte für den Objektpunkt, um den das Messvolumen aufgespannt wird, angegeben. Links: zwei Kameras inklusive Kameraposition der Versuchsingenieure; Mitte: drei Kameras inklusive Kameraposition der Versuchsingenieure; Rechts: zwei Kameras ohne Kameraposition der Versuchsingenieure.

Da die Qualität der dreidimensionalen Objektpunktkoordinaten unter anderem abhängig vom Netzdesign und der vorliegenden Schnittgeometrie der Abbildungsstrahlen ist [WIGGENHAGEN & RAGUSE, 2003], weisen die Konfidenzellipse in Bild 4-8 links deutliche Unterschiede zu den Konfidenzellipsoiden in Bild 4-8 Mitte und rechts auf. Das Abstands-Basis-Verhältnis, welches pro Kamera paar berechnet werden kann, ist für die Konstellation in der linken Darstellung um den Faktor zwei größer als für die Konstellation der Kameras in der rechten Darstellung. Die daraus resultierende ungünstigere Schnittgeometrie der Abbildungsstrahlen führt zu einem Genauigkeitsverlust der Tiefenkoordinaten der einzelnen Objektpunkte um diesen Faktor.

Absolut betrachtet liegen die Genauigkeitsvariationen für die unterschiedlichen Kamerakonstellationen jedoch in einem derart geringen Bereich, dass sie für die Auswahl der im Versuch eingesetzten Kamerapositionen nicht von höchster Bedeutung sind. So müsste zum Beispiel die Basis zwischen dem Kamerapaar in der linken Darstellung auf 20 cm sinken, um die geforderte Genauigkeit von 5 mm nicht erreichen zu können.

Des Weiteren ist festzuhalten, dass der Einsatz von drei Kameras keine entscheidende Steigerung der Objektpunktgenauigkeit mit sich bringt. Durch eine dritte Kamera kann vielmehr die Redundanz der Beobachtungen und somit die Überbestimmung im Ausgleichsprozess erhöht werden, durch die die Objektpunktkoordinaten mit einer höheren Zuverlässigkeit bestimmt werden können. Hinzu kommt, dass beim Einsatz von nur zwei Kameras die Berechnung einer dreidimensionalen Koordinate unmöglich wird, sobald die jeweilige Messmarke in nur einer Kamera nicht gemessen werden kann. Da erhebliche Störungen im Bild während der Fahrzeugdeformation durch Bauteile, sowie die Zugseile, über die das Fahrzeug beschleunigt wird auftreten, werden die Trajektorien der einzelnen Messmarken auf der Bildebene häufig unterbrochen. Beim Einsatz von nur zwei Kameras resultiert hieraus ebenfalls eine Unterbrechung in der dreidimensionalen Trajektorie des Messpunktes.

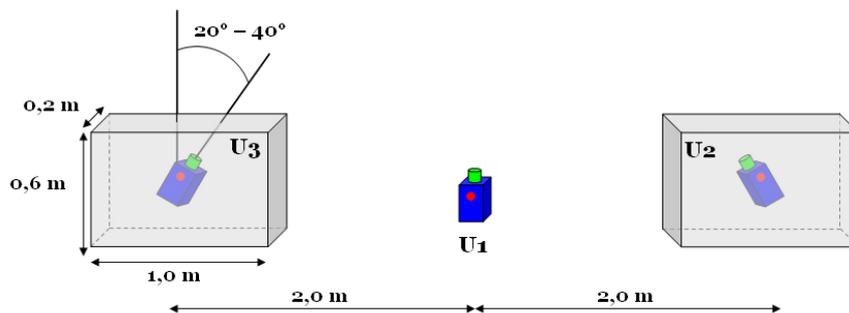


Bild 4-9 **Bereiche für geeignete Kamerapositionen**
Durch die photogrammetrische Aufnahmeplanung und die Einschränkungen in der praktischen Umsetzbarkeit festgelegte Bereiche für geeignete Kamerapositionen.

Als Ergebnis der photogrammetrischen Aufnahmeplanung sind Bereiche für die in der Praxis umsetzbaren und im Rahmen der theoretischen Genauigkeitsbetrachtung geeigneten Kamerapositionen für die beiden seitlichen Kameras festgelegt worden [Bild 4-9].

4.2.5 Umsetzung

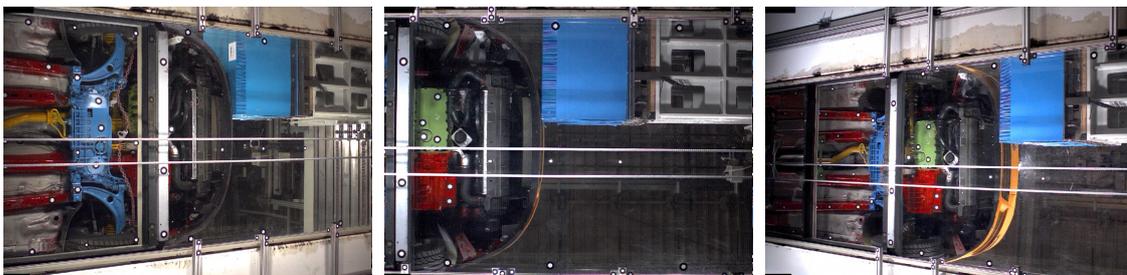


Bild 4-10 **Umsetzung der geplanten Kamerapositionen**
Aufnahmen der umgesetzten Kamerapositionen bei einem Crash zum Zeitpunkt t_0 . Kamera-bezeichnungen; Links: U3; Mitte: U1; Rechts: U2.

Die in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.4 erzielten Ergebnisse sind für die Realisierung stabiler und geeigneter Kamerapositionen in den Versuchsaufbau und Versuchsablauf integriert worden. So wurden im Rahmen der definierten Bereiche [Bild 4-9] für geeignete Kamerapositionen die Kameras U2 und U3 als Schrägansichten von der Fahrzeugunterseite eingerichtet.

Die in Bild 4-10 dargestellten Aufnahmen der Kamerapositionen bei einem Crash mit Deformationsbarriere zeigen deutlich, dass durch das installierte Passpunktfeld keine versuchsrelevanten Informationen verdeckt werden. Des Weiteren können die Parameter der äußeren Orientierung im Ausgleichsprozess über die neuen Passpunkte ungefähr um den Faktor 15 genauer bestimmt werden als direkt im Fahrzeugkoordinatensystem über die Passpunkte an der Fahrzeugunterseite [Tabelle 4-1]. In Tabelle 4-2 sind die Anzahl der beobachtbaren Passpunkte von den einzelnen Kamerapositionen und die erreichten Standardabweichungen für die jeweiligen Orientierungsparameter angegeben.

Kamera	Anzahl Passpunkte	s_x [mm]	s_y [mm]	s_z [mm]	s_ω [°]	s_φ [°]	s_κ [°]
U1	33	0,9	1,1	0,2	0,023 (1,2 mm)	0,018 (0,9 mm)	0,005 (0,3 mm)
U2	28	1,1	1,6	1,1	0,031 (1,6 mm)	0,024 (1,3 mm)	0,015 (0,8 mm)
U3	19	1,4	1,8	1,1	0,035 (1,8 mm)	0,031 (1,6 mm)	0,019 (1,0 mm)

Tabelle 4-2 Standardabweichungen der äußeren Orientierung im Fotogrubensystem
 Ergebnisse für die Standardabweichungen der Orientierungsparameter im Fotogrubenkoordinatensystem. Für die Standardabweichungen der Orientierungswinkel sind die Auswirkungen der Winkelungenauigkeiten im Objektraum, bestimmt über die Bogenformel $b/r = \alpha/\rho$ bei einem Aufnahmeabstand von 3.2 m, angegeben.

Die erzielten Ergebnisse mit Standardabweichungen bis maximal 1,8 mm bilden eine sehr gute Grundlage für die, in einem zweiten Auswerteschritt folgende Triangulation zur dreidimensionalen Punktbestimmung der Fahrzeugunterbodenpunkte.

4.2.6 Zusammenfassung



Bild 4-11 Aufnahmesituation in der Fotogrube
 Darstellung der Fotogrube inklusive Scheinwerfern, Passpunktadaptern und Blick auf die Acrylglasplatte (Mitte). Links und rechts ist zusätzlich die Kameraposition U1 dargestellt.

In diesem Kapitel ist die Einrichtung eines Passpunktfeldes in der Fotogrube von den theoretischen Vorüberlegungen bis hin zur praktischen Umsetzung [Bild 4-11] beschrieben worden. Über die Passpunkte besteht die Möglichkeit die Orientierungsparameter der Kameras im neu definierten Fotogrubenkoordinatensystem mit Standardabweichungen unter 2,0 mm zu bestimmen. Für die Auswahl geeigneter Kamerastandorte sind Bereiche für die beiden seitlichen Kameras U2 und U3 definiert worden [Bild 4-9], die unter Berücksichtigung der theoretisch erreichbaren Genauigkeit und praktischen Umsetzbarkeit festgelegt worden sind. Bei Einhaltung dieser Bereiche werden die Passpunkte lediglich in den äußersten Randbereichen der Fotogrubenabdeckung abgebildet, so dass es zu keinerlei Verdeckung von versuchsrelevanten Informationen kommt.

Die erzielten Ergebnisse bilden eine entscheidende Grundlage für die weiteren Überlegungen zur Realisierung einer dreidimensionalen Filmauswertung der Fahrzeugunterseite.

4.3 Allgemeine Modellierung der Abbildungsgeometrie

Für eine dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite mit einer geforderten Genauigkeit von 5 mm müssen die realen Abbildungsvorgänge, die durch den Einfluss der Acrylglasplatte im Strahlengang nicht der Zentralperspektive entsprechen, modelliert werden. In diesem Kapitel wird ein allgemeiner Ansatz für die Berücksichtigung des Fehlereinflusses auf die gemessenen Bildkoordinaten hergeleitet.

4.3.1 Erste Untersuchungen

Als vereinfachte erste Annahme ist der in Kapitel 3.2 dargestellte Ansatz für die Berücksichtigung einer planparallelen Brechungsebene bei angenommener Parallelität zwischen Sensor und Brechungsebene implementiert worden. Über diesen Zusammenhang kann eine Aussage über die Größenordnung des Fehlereinflusses auf die Bild- und Objektkoordinaten getroffen werden. Hierzu wird ein ebenes Objektpunktraaster in Höhe der Fahrzeugpunkte mit zugehörigen Bildkoordinaten simuliert. Zusätzlich ist die Acrylglasplatte [Kapitel 5.1.3] modelliert und im Strahlengang eingebettet. Für eine erste Fehlerabschätzung trifft der in Kapitel 3.2 angenommene Sonderfall auf die senkrecht zur Fahrzeugunterseite ausgerichteten Kamera U1 ausreichend genau zu.

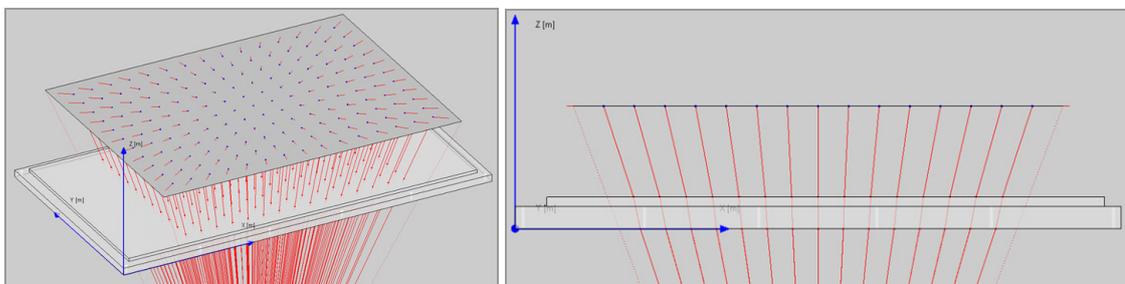


Bild 4-12

Sonderfall Parallelität Sensorebene U1 und Acrylglasplatte

MATLAB Visualisierung des implementierten Sonderfalls für die Kamera U1. Links: Darstellung der Residuen im Objektraum (zehnfach überhöht); Rechts: gebrochene Abbildungsstrahlen.

Bild 4-12 visualisiert die Abbildungsstrahlen von den einzelnen Punkten des ebenen Punktrasters über das Projektionszentrum der Kamera U1 zu den jeweiligen Bildkoordinaten. Zusätzlich sind die Durchstoßpunkte der Abbildungsstrahlen an der Ein- und Austrittsfläche der Brechungsebene abgebildet, die für die Darstellung der gebrochenen Abbildungsstrahlen [Bild 4-12 rechts] und die Berechnung der radialen Fehler benötigt werden. Auf der Punktrasterebene veranschaulichen die Residuen den zehnfach überhöhten radialen Fehler in der X - Y Ebene bezogen auf den Bildhauptpunkt bzw. auf die optische Achse [Bild 4-12 links]. Der Fehler wirkt hier ähnlich wie die radial-symmetrische Verzeichnung der inneren Orientierung, die ebenfalls bei größer werdendem Radius zwischen jeweiligem Bildpunkt und Bildhauptpunkt eine stärkere radiale Verschiebung zur Folge hat.

Die Systematik der Bildkoordinatenfehler macht eine genaue Untersuchung für die Übertragung der Brechungseinflüsse vom Bildraum in den Objektraum erforderlich. Die bei der dreidimensionalen Punktbestimmung mit den beeinflussten Bildkoordinaten erhaltenen Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten ermöglichen nur bedingt eine Aussage über die aus der Brechung resultierenden Fehler im Objektraum. So können die systematischen Einflüsse auf die Bildkoordinaten bei der Triangulation zu Ergebnissen mit geringen Standardabweichungen, jedoch mit systematischen Objektpunktverschiebungen führen.

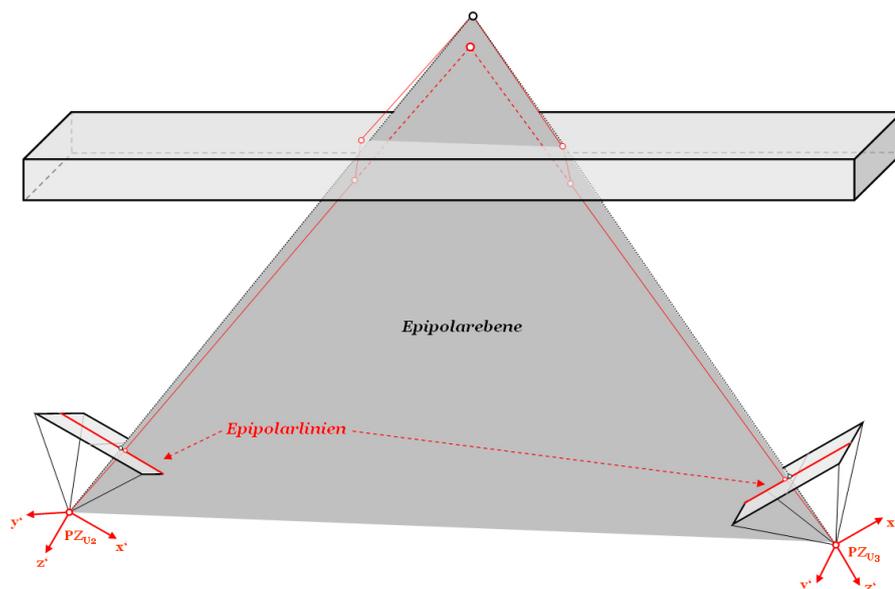


Bild 4-13 **Epipolargeometrie bei der Aufnahme mit U2 und U3**
Darstellung der Bewegung der Bildkoordinaten auf der jeweiligen Epipolarlinie und der daraus resultierenden systematischen Verschiebung des Objektpunktes.

Dieser Fall tritt dann ein, wenn die Epipolarlinien des gemessenen und des um den Brechungseinfluss korrigierten Bildpunkt identisch sind und der Brechungseinfluss somit nur innerhalb der Epipolarebene wirkt. Bei dem vorhandenen Versuchsaufbau in der Fotogrube sind diese Auswirkungen besonders im mittleren Bereich der Acrylglasplatte zu erwarten [Bild 4-13]. Laufen die Abbildungsstrahlen für die Punktbestimmung hingegen durch den Randbereich der Scheibe, wirkt sich der Brechungseinfluss nicht nur in der Epipolarebene aus. Dies hat zur Folge, dass die Bildkoordinaten der gemessenen und der korrigierten Bildpunkte nicht auf einer identischen Epipolarlinie liegen. Bei der Triangulation von Punkten im Randbereich der Scheibe ist durch diesen Zusammenhang eine größere Standardabweichung der Objektpunktkoordinaten zu erwarten.

naten zu erwarten, da die Abbildungsstrahlen hier durch den Einfluss der Lichtbrechung windschief im Raum verlaufen. In diesen Bereichen wird somit, anders als in den mittleren Bereichen, der Fehlereinfluss der Acrylglasplatte durch die Standardabweichungen der bestimmten Objektkoordinaten erkennbar.

Weiterhin veranschaulicht Bild 4-13 die systematischen Auswirkungen der fehlerhaften Bildkoordinatenmessung auf die dreidimensionale Punktbestimmung. Die Vernachlässigung des Brechungseinflusses der Acrylglasplatte führt bei der Triangulation zu systematischen Fehlern der Objektpunktkoordinaten. Diese Systematik resultiert aus der jeweiligen Brechung der Lichtstrahlen beim Eintritt in das Medium zur Flächennormalen der Trennebene und beim Austritt aus dem Medium von der Flächennormalen der Trennebene weg. Da das Medium einer planparallelen Platte entspricht, liegt der geradlinige Abbildungsstrahl gegenüber dem realen Abbildungsstrahl, bei gleicher Raumrichtung, systematisch tiefer. So wird über den Schnittpunkt der geradlinigen Abbildungsstrahlen ein systematisch zu tief liegender Objektpunkt bestimmt. Im Randbereich der Acrylglasplatte wirkt sich die Brechung zusätzlich zur systematischen Objektpunktverschiebung in Z -Richtung als systematische Verschiebung in X - und Y -Richtung aus, da sich die Auswirkungen der Lichtbrechung in diesen Bereichen und bei vorhandenem Versuchsaufbau in der Fotogrupe nicht auf eine Ebene beschränken.

Eine grobe Abschätzung der Größenordnung für die hauptsächlich in Z -Richtung wirkende Objektkoordinatenverschiebung lässt sich anhand einer beispielhaften Kamerakonstellation mit zwei Kameras [Bild 4-13 und Bild 4-14] und einem innerhalb der Epipolarebene wirkendem Brechungseinfluss vereinfacht durchführen. Trifft diese Annahme zu, wirkt sich der Brechungseinfluss auf die Bildkoordinaten bei der Triangulation als systematische Objektpunktverschiebung ausschließlich in Z -Richtung aus. Aus den in Bild 4-12 visualisierten Ergebnissen lässt sich im Randbereich des Objektpunktrasters für den mittig liegenden Punkt ein dimensionale Lageverschiebung von 11,2 mm in X -Richtung ableiten. Umgerechnet auf die Bildebene führt dieser Versatz im Objektraum zu einer Abweichung von sieben Pixeln in x' -Richtung. Mit diesen sieben Pixeln als maximal angenommene Auswirkung der Brechungseinflüsse auf die Bildkoordinaten bei vorhandener Parallelität zwischen Bild- und Brechungsebene lässt sich der Einfluss auf die dreidimensionale Punktbestimmung abschätzen.

Über

$$Z_i = \frac{b \cdot c}{2 \cdot x'_i}$$

ergeben sich beispielhaft folgende Größen:

	c [mm]	b [mm]	x' [px]	x'' [px]	Z [mm]
P ₁	24	2400	740	740	3243,2
P ₂	24	2400	747	747	3212,9

$$\Delta Z = 30,3$$

Tabelle 4-3 **Z - Verschiebung**
Beispielhafte Z - Verschiebung eines Objektpunktes durch die Brechungseinflüsse der Acrylglasplatte.

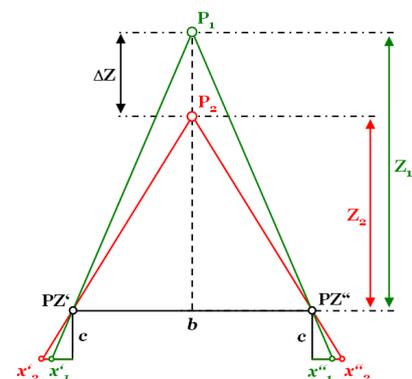


Bild 4-14 **Z - Verschiebung**
Systematische Z - Verschiebung der Objektkoordinate.

Die in Tabelle 4-3 verwendeten Werte für die Aufnahmebasis b , die Kamerakonstante c und die Bildkoordinaten x' bzw. x'' entsprechen ungefähr den Größenordnungen für den Versuchsaufbau und den eingesetzten Kameras in der Fotogrube. Als Pixelgröße der einzelnen Bildelemente sind $12\ \mu\text{m}$ angenommen worden. Die Bildkoordinaten x' bzw. x'' liegen im äußersten Sensorbereich und variieren für die Bestimmung der Objektpunkte P_1 und P_2 um die aus Bild 4-12 abgeleiteten sieben Pixel. Diese Variation der Bildkoordinaten hat für den analysierten beispielhaften Fall eine Objektpunktverschiebung in Z – Richtung von $30,3\ \text{mm}$ zur Folge. Der Brechungseinfluss führt hier ausschließlich zur systematischen Lageverschiebung in Z – Richtung und ist über die reine Betrachtung der Standardabweichungen bei der dreidimensionalen Punktbestimmung nicht aufzudecken.

Eine ähnliche Auswirkung auf die Objektkoordinaten ist bei asynchron aufgenommen Bildsequenzen zu beobachten, durch die sich eine Bewegung des Objektes innerhalb der Epipolarebene ebenfalls als systematische Objektpunktverschiebung auswirkt. Verläuft die Bewegung des Objektes nicht innerhalb der Epipolarebene, führt dies, wie beim Brechungseinfluss einer Trennebene, zu windschief im Raum verlaufenden Abbildungsstrahlen und somit zur Vergrößerung der Standardabweichungen der bestimmten Objektpunktkoordinaten [RAGUSE, 2007].

Für die Korrektur der erläuterten Brechungseinflüsse der Acrylglasplatte auf die Bildkoordinatenmessung wird in den folgenden Kapiteln ein im Rahmen vorliegender Arbeit entwickelter Ansatz zur Modellierung der allgemeinen Abbildungsgeometrie vorgestellt.

4.3.2 Strategie für die Modellierung der Abbildungsgeometrie

Um neben der Kamera U_1 , die ungefähr dem Sonderfall [Kapitel 3.2] entspricht, konvergente Aufnahmen der Kameras U_2 und U_3 bei der dreidimensionalen Auswertung nutzen zu können, muss ein allgemeiner Ansatz für die Modellierung der realen Abbildungsgeometrie gefunden werden. In diesem Kapitel wird ein Überblick über die entwickelte Strategie für die Korrektur der Bildkoordinaten gegeben. Die einzelnen Teilschritte werden dabei in den folgenden Kapiteln genauer diskutiert.

Wie in Bild 4-15 dargestellt, kann die allgemeine Fehlermodellierung in sechs Teilschritten erläutert werden. So wird zunächst die Orientierung der Acrylglasplatte im Strahlengang bestimmt. Hierzu kleben Messmarken an der Unterseite der Platte, die über die Kameras in der Fotogrube und ohne Einfluss der Acrylglasplatte im Fotogrubenkoordinatensystem trianguliert werden können. Aus diesen Punkten lässt sich über eine Ebenenausgleichung die Flächennormale der Acrylglasplatte bestimmen [Kapitel 4.3.3]. Mit dem berechneten Normalenvektor wird in einem zweiten Schritt ein neuer Bezugspunkt für die radiale Verschiebung der Bildkoordinaten berechnet [Kapitel 4.3.4]. Dieser Bezugspunkt ersetzt den im Sonderfall verwendeten Bildhauptpunkt als Bezug für die radiale Verschiebung der Bildkoordinaten. Im nächsten Teilschritt werden für alle Abbildungsstrahlen die Höhen des jeweiligen Objektpunktes über den eingesetzten Kameras und über der Acrylglasplatte bestimmt [Kapitel 4.3.5]. Anschließend wird für jeden Abbildungsstrahl der Auftreffwinkel auf die Fotogrubenabdeckung berechnet [Kapitel 4.3.6]. Über die Anwendung des Brechungsgesetzes nach SNELLIUS lässt sich darauf aufbauend auf die radiale Verschiebung im Objektraum schließen [Kapitel 4.3.7]. Abschließend wird der Fehler im Objektraum auf die Bildebene umgerechnet und proportional auf die Bildkoordinaten als Korrekturterme $\Delta x'$ und $\Delta y'$ verteilt [Kapitel 4.3.8].

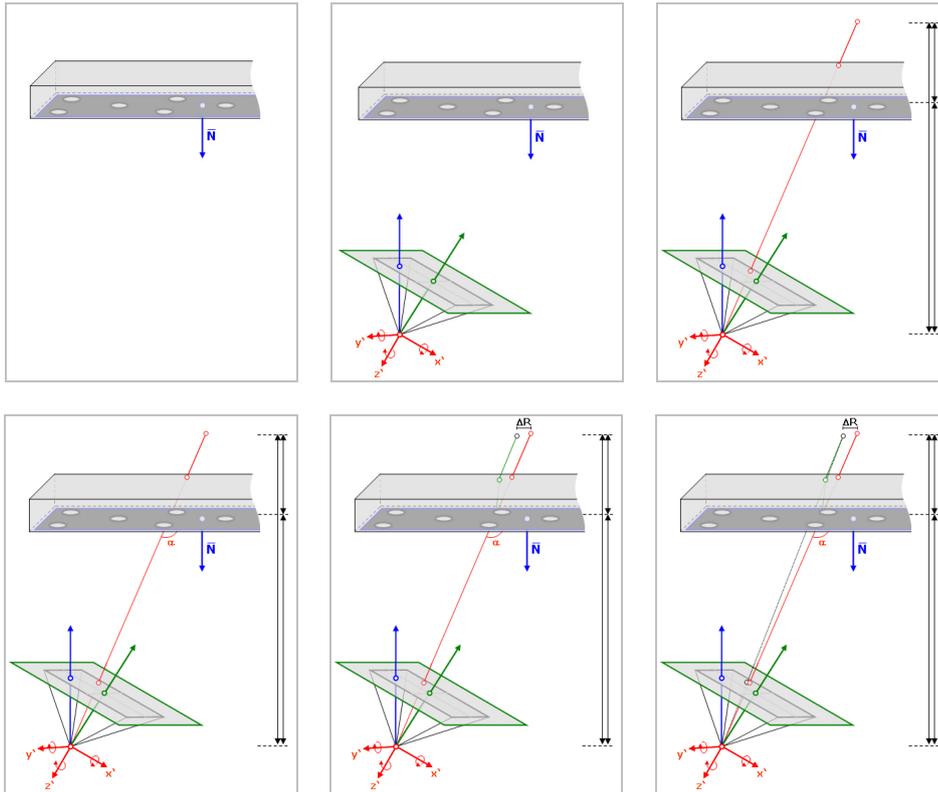


Bild 4-15 **Strategie zur allgemeinen Fehlermodellierung**
Darstellung der allgemeinen Fehlermodellierung in sechs Teilschritten.

4.3.3 Orientierung der Acrylglasplatte im Strahlengang

Die Bestimmung der Orientierung der Acrylglasplatte im Strahlengang erfolgt über die Schätzung einer optimalen Ebene in die dreidimensionale Punktwolke auf der Unterseite der Scheibe. Für die Aufstellung des funktionalen Zusammenhangs wird zunächst ein kurzer Überblick über die Möglichkeiten der mathematischen Beschreibung einer Ebene gegeben.

Eine Ebene ist eindeutig definiert über

- drei Punkte, die nicht auf einer Geraden liegen oder
- einen Punkt und zwei linear unabhängige Vektoren oder
- einen Punkt und einen Normalenvektor.

Diese Festlegung führt zu zwei verschiedenen Möglichkeiten eine Ebene mathematisch zu beschreiben. Die anschauliche Parameterdarstellung einer Ebene resultiert aus den ersten beiden Festlegungen und ergibt sich zu

$$E: \mathbf{x} = \vec{a} + r \cdot \vec{b} + s \cdot \vec{c} \quad , \quad \text{mit } r, s \in \mathbb{R}. \quad (4-1)$$

Hierbei wird die Ebene im Endpunkt von \vec{a} gelagert und über die beiden linear unabhängigen Vektoren \vec{b} und \vec{c} aufgespannt. Die für das funktionale Modell besser geeignete Koordinatendarstellung

$$E: \vec{n} \cdot \vec{x} - d = 0 \quad (4-2)$$

wird nach Normierung des Normalenvektors \vec{n} auf die Länge eins auch als HESSESche Normalform (HNF) bezeichnet. Sie besitzt den Vorteil, dass der Abstand v_i zu einem beliebigen Punkt P_i im Raum über die Länge des Lotes von P_i auf die Ebene berechnet werden kann:

$$v_i = |\vec{n} \cdot \vec{p}_i - d| \quad , \quad \text{mit} \quad |\vec{n}| = 1 \quad (4-3)$$

Liegen Informationen über mehr als drei Punkte, die die Ebene beschreiben sollen vor, muss zur eindeutigen Bestimmung der Ebenenparameter eine ausgleichende Ebene nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden. Hierbei soll die Quadratsumme der orthogonalen Abstände der ausgleichenden Ebene zu den vorgegebenen Punkten minimiert werden [Bild 4-16].

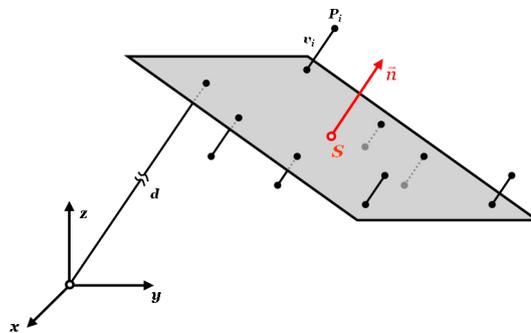


Bild 4-16 **Ausgleichende Ebene**
Darstellung einer ausgleichenden Ebene durch die Punkte P_i , die durch den Schwerpunkt S und den Normalenvektor \vec{n} definiert ist.

Für die Formulierung eines funktionalen Zusammenhangs wird zunächst der Schwerpunkt

$$S^T = (x_s \quad y_s \quad z_s) \quad , \quad \text{mit} \quad x_s = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad y_s = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i, \quad z_s = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n z_i \quad (4-4)$$

aller beteiligten Messpunkte gebildet, um den Abstandsparameter d durch schwerpunktsbezogene Koordinaten eliminieren zu können. Da die ausgleichende Ebene in diesem Punkt gelagert wird, kann mit dem Normalenvektor \vec{n} für jeden beliebigen Punkt $P_i(x, y, z)$ der Abstand

$$v_i = n_x \cdot (x - x_s) + n_y \cdot (y - y_s) + n_z \cdot (z - z_s) \quad (4-5)$$

bestimmt werden. Mit dem Schwerpunkt S , den Objektpunktkoordinaten als Beobachtungen L und den Elementen des Normalenvektors als Unbekannte X ergibt sich die implizite Formulierung des funktionalen Modells zu

$$\varphi(\hat{L}, \hat{X}) = \hat{n}_x \cdot (\hat{x} - x_s) + \hat{n}_y \cdot (\hat{y} - y_s) + \hat{n}_z \cdot (\hat{z} - z_s) = 0 \quad (4-6)$$

Um die triviale Lösung

$$\hat{n}_x = \hat{n}_y = \hat{n}_z = 0 \quad (4-7)$$

zu vermeiden, muss als weitere Bedingung die Normierung des Normalenvektors $|\vec{n}|=1$ eingeführt werden. Der endgültige funktionale Zusammenhang wird durch

$$\varphi(\hat{L}, \hat{X}) = \hat{n}_x \cdot (\hat{x} - x_s) + \hat{n}_y \cdot (\hat{y} - y_s) + \hat{n}_z \cdot (\hat{z} - z_s) + \hat{n}_x^2 + \hat{n}_y^2 + \hat{n}_z^2 - 1 = 0 \quad (4-8)$$

beschrieben und macht eine Parameterschätzung im GAUSS – HELMERT – Modell [Kapitel 2.3.2] erforderlich. Für die Linearisierung dieser Beziehungen müssen Näherungswerte für den Normalenvektor bekannt sein. Eine einfache Möglichkeit für deren Bestimmung ist die Bildung von zwei Vektoren \vec{a} und \vec{b} aus drei beliebigen Punkten der Ebene und die anschließende Berechnung des Kreuzproduktes über

$$\begin{aligned} n_x^0 &= a_y \cdot b_z - a_z \cdot b_y \\ n_y^0 &= a_z \cdot b_x - a_x \cdot b_z \\ n_z^0 &= a_x \cdot b_y - a_y \cdot b_x. \end{aligned} \quad (4-9)$$

Eine bessere Lösung liefert der Ansatz der so genannten orthogonalen Regression [DRIXLER, 1993] basierend auf der Spektralzerlegung einer reellwertigen symmetrischen Matrix. Hierzu werden in der Modalmatrix A die schwerpunktsbezogenen Koordinaten aller beteiligten Punkte gebildet:

$$\frac{A}{n,u} = \begin{pmatrix} x_i - x_s & y_i - y_s & z_i - z_s \\ x_{i+1} - x_s & y_{i+1} - y_s & z_{i+1} - z_s \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_s & y_n - y_s & z_n - z_s \end{pmatrix} \quad (4-10)$$

Über die Spektralzerlegung der symmetrischen Normalgleichungsmatrix $N = A^T \cdot A$ ergeben sich die Eigenwerte λ_{min} , λ_{mid} , λ_{max} und die dazugehörigen Eigenvektoren \vec{u}_{min} , \vec{u}_{mid} , \vec{u}_{max} . Der gesuchte Normalenvektor der Ebene ist mit dem Eigenvektor identisch, dessen zugehöriger Eigenwert minimal ist. Die beiden Eigenvektoren \vec{u}_{mid} und \vec{u}_{max} spannen die bestangepasste Ebene auf [HECKEL ET AL., 2001]. Dieser Ansatz stellt eine gute Möglichkeit für die Näherungswertbeschaffung dar, bietet jedoch keine Möglichkeit grobe Fehler im Datenmaterial zu lokalisieren [RIETDORF, 2004]. Über die so bestimmten Näherungswerte lässt sich zunächst der Widerspruchsvektor $w = \varphi(L, X^0)$ bestimmen. Des Weiteren ergibt sich die Designmatrix A durch die Ableitungen der funktionalen Beziehungen nach den Unbekannten zu

$$\frac{A}{b,u} = \begin{pmatrix} x_i - x_s + 2 \cdot n_x^0 & y_i - y_s + 2 \cdot n_y^0 & z_i - z_s + 2 \cdot n_z^0 \\ x_{i+1} - x_s + 2 \cdot n_x^0 & y_{i+1} - y_s + 2 \cdot n_y^0 & z_{i+1} - z_s + 2 \cdot n_z^0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_b - x_s + 2 \cdot n_x^0 & y_b - y_s + 2 \cdot n_y^0 & z_b - z_s + 2 \cdot n_z^0 \end{pmatrix} \quad (4-11)$$

und die B – Matrix durch die Ableitungen nach den Beobachtungen zu

$$\frac{B}{b,n} = \begin{pmatrix} n_x^0 & n_y^0 & n_z^0 & & & & 0 \\ & & & n_x^0 & n_y^0 & n_z^0 & & \\ & & & & & & \ddots & \\ & & & & & & & n_x^0 & n_y^0 & n_z^0 \\ & 0 & & & & & & & & & \end{pmatrix}. \quad (4-12)$$

Das stochastische Modell wird mit den Genauigkeitsinformationen der einzelnen Punktkoordinaten aus der photogrammetrischen Punktbestimmung aufgestellt. Steht die Kofaktormatrix Q_{LL} zur Verfügung, kann der unter Kapitel 2.3.2 aufgezeigte Lösungsalgorithmus für die Para-

meterschätzung im GAUSS – HELMERT – Modell angewendet werden. Neben den ausgeglichenen Unbekannten lassen sich Informationen über die erreichbaren Genauigkeiten der Parameterschätzung ableiten.

n_x^o	=	0.036	\hat{n}_x	=	- 0.030	s_{n_x}	=	0.000011
n_y^o	=	- 0.035	\hat{n}_y	=	- 0.036	s_{n_y}	=	0.000002
n_z^o	=	0.999	\hat{n}_z	=	0.999	s_{n_z}	=	0.000001

Tabelle 4-4 **Ausgleichsergebnisse der Orientierung der Acrylglasplatte**
Beispielhafte Ergebnisse der Ebenenausgleichung. Dargestellt sind die Näherungswerte durch Spektralzerlegung, die ausgeglichenen Parameter und deren Standardabweichungen.

Tabelle 4-5 zeigt beispielhaft Näherungswerte, Ergebnisse für den ausgeglichenen Normalenvektor der Acrylglasplatte und dessen Genauigkeit. Hierbei handelt es sich um auf die Länge eins normierte Vektoren, so dass die berechneten Werte ohne Einheiten angegeben werden. Diese Ausgleichsergebnisse werden für die folgende Berechnung eines neuen Bezugspunktes für die radiale Verschiebung verwendet.

Des Weiteren ist darauf zu achten, welche Orientierung der bestimmte Normalenvektor besitzt. Die mathematische Konvention der HESSESchen Normalform sagt aus, dass der Abstand d immer positiv sein soll [RIETDORF, 2004]. Da das funktionale Modell auf Grundlage der HESSESchen Normalform aufgestellt worden ist, bedeutet dies geometrisch gesehen, dass der ausgeglichene Normalenvektor aus der Fotogrube nach oben zeigt. So entspricht die bestimmte Orientierung der Acrylglasplatte der für die Berechnung des neuen Bezugspunktes [Kapitel 4.3.4] benötigten Ausrichtung.

4.3.4 Neuer Bezugspunkt für radiale Verschiebung

Die radiale Verschiebung auf der Bildebene bezieht sich in dem unter Kapitel 3.2 vorgestellten Sonderfall auf die Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes. Der Grund hierfür liegt darin, dass die optische Achse senkrecht auf die Brechungsebene trifft und so als Bezug für die Ausrichtung des Brechungseinflusses angenommen werden kann. Liegt dieser Sonderfall nicht vor, muss ein neuer Bezugspunkt für den Brechungseinfluss und den daraus resultierenden radialen Fehlern bestimmt werden. Für die Berechnung dieses Punktes ist die Orientierung der Brechungsebene im Strahlengang [Kapitel 4.3.3] von entscheidender Bedeutung. Da der neue Bezugspunkt abhängig von der relativen Ausrichtung zwischen Bild- und Brechungsebene ist, werden für dessen Berechnung neben der Flächennormalen der Acrylglasplatte die Orientierungselemente der jeweiligen Kamera benötigt.

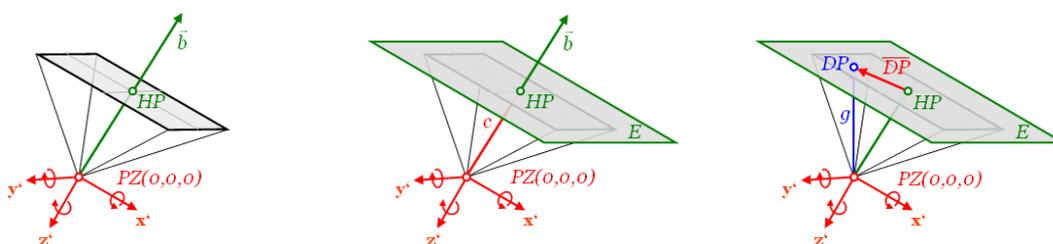


Bild 4-17 **Durchstoßpunktberechnung**
Darstellung der Zusammenhänge für die Berechnung eines neuen Bezugspunktes für die radiale Verschiebung.

Wie in Bild 4-17 links dargestellt, wird in einem ersten Schritt der Blickrichtungsvektor für die jeweilige Kamera bestimmt. Über die Parameter der äußeren Orientierung kann die Rotationsmatrix R aufgestellt werden, mit der über

$$\vec{b} = \underset{3 \cdot 3}{R} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \sin \omega \cos \varphi \\ \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (4-13)$$

der Blickrichtungsvektor für die Kamera berechnet werden kann. Anschaulich beschreibt dieser Vektor die Ausrichtung der optischen Achse im Raum. Unter Hinzunahme des kalibrierten Parameters für die Kamerakonstante c und der Normierung des Blickrichtungsvektors auf die Länge eins kann in einem weiteren Schritt [Bild 4-17 Mitte] über Formel (4-2) eine Ebene

$$E: \vec{b} \cdot \vec{x} = c \quad (4-14)$$

aufgespannt werden, die in der Bildebene gelagert ist. Der Zusammenhang zwischen dieser Ebene und der geschätzten optimalen Ebene für die Acrylglasplatte wird über die Raumgerade

$$g: t \cdot \vec{n} = \vec{x} \quad (4-15)$$

hergestellt, wobei \vec{n} den ausgeglichenen Normalenvektor der Brechungsebene darstellt. Die Koordinaten des Durchstoßpunktes DP werden über

$$b_x \cdot n_x \cdot t + b_y \cdot n_y \cdot t + b_z \cdot n_z \cdot t = c$$

$$\rightarrow t = \frac{c}{b_x \cdot n_x + b_y \cdot n_y + b_z \cdot n_z} \quad (4-16)$$

$$\rightarrow DP = t \cdot (n_x \quad n_y \quad n_z)$$

berechnet. Für die Bestimmung der x' - und y' -Koordinaten des Durchstoßpunktes in der Ebene bezogen auf den Bildhauptpunkt wird in einem weiteren Schritt ein Vektor zwischen dem Bildhauptpunkt und dem Durchstoßpunkt aufgespannt. Hierfür wird die Differenz der Vektoren

$$\overline{DP} = (\vec{n} \cdot t) - (\vec{b} \cdot c) \quad (4-17)$$

gebildet. Als interne Kontrolle bietet sich an dieser Stelle die Bildung des Skalarproduktes zwischen den Vektoren \overline{DP} und \vec{b} an:

$$\overline{DP} \cdot \vec{b} = 0. \quad (4-18)$$

Da die aufgespannte Ebene senkrecht zur optischen Achse liegen sollte, muss das Ergebnis des Skalarproduktes zu Null werden. Nach dieser Kontrolle können die Koordinaten in der Ebene über

$$\begin{aligned} x'_{DP} &= \overline{DP}_x \\ y'_{DP} &= \overline{DP}_y \end{aligned} \quad (4-19)$$

angegeben werden. Hierbei sollte erwähnt werden, dass die Koordinaten des Durchstoßpunktes im Folgenden zwar als Bildkoordinaten behandelt werden, aber keineswegs auf die Bildebene des Sensors beschränkt sind. Dieser Fall tritt ein, wenn der Auftreffwinkel der optischen Achse auf die Brechungsebene größer als der halbe diagonale Bildwinkel der eingesetzten Kamera – Objektiv Kombination ist. Bei den hier verwendeten Kameraorientierungen würde ein Vergleich

zum halben horizontalen Bildwinkel für eine grobe Abschätzung genügen. Formell lässt sich dieser Zusammenhang für den diagonalen Bildwinkel über

$$\cos^{-1}\left(\frac{\bar{b} \cdot \bar{n}}{|\bar{b}| \cdot |\bar{n}|}\right) < \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{\text{Bildbreite}^2 + \text{Bildhöhe}^2}}{2 \cdot c}\right) \quad (4-20)$$

prüfen.

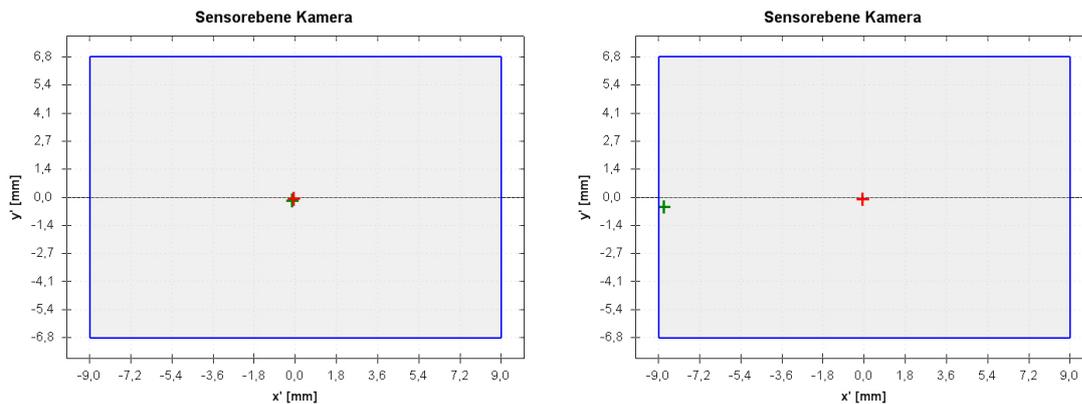


Bild 4-18 Bildhauptpunkte und Durchstoßpunkte
Visualisierung der Bildebene von den Kameras U1 (links) und U3 (rechts). In rot sind die Bildhauptpunkte, in grün die Durchstoßpunkte dargestellt.

Bild 4-18 stellt die berechneten Durchstoßpunkte beispielhaft für die Kameras U1 und U3 dar. Wie zu erkennen ist, trifft der Sonderfall [Kapitel 3.2] für die senkrecht zum Fahrzeug positionierte Kamera U1 in grober Näherung [Tabelle 4-5] zu.

Kamera	x_0' [mm]	y_0' [mm]	x_{dp}' [mm]	y_{dp}' [mm]
U1	-0.078	-0.080	-0.148	-0.153
U2	-0.034	-0.095	14.303	-1.150
U3	-0.118	-0.049	-8.793	-0.445

Tabelle 4-5 Bildhauptpunkte und Durchstoßpunkte
Beispielhafte Bildkoordinaten der Bildhauptpunkte und der berechneten Durchstoßpunkte.

Des Weiteren zeigt Tabelle 4-5, dass der Durchstoßpunkt für die Kamera U2 außerhalb des Sensors liegt. Bei einem verwendeten Sensorformat von 1504 x 1128 Pixel und einer Pixelgröße von 12 μm beträgt die maximale Verschiebung in x' – Richtung auf der Bildebene 9,024 mm vom Bildmittelpunkt aus in beide Richtungen. Da die x' – Koordinate des Durchstoßpunktes mit 14,303 mm größer ist als dieser Grenzwert, liegt der neue Bezugspunkt nicht mehr auf dem abgebildeten Sensor. Dies kann ebenfalls über den diagonalen bzw. horizontalen Bildwinkel und dem Auftreffwinkel der optischen Achse gezeigt werden. Die optische Achse der Kamera U2 trifft unter einem Winkel von 35,608° auf die Brechungsebene. Bei dem eingesetzten Sensorformat ergibt sich für den horizontalen halben Bildwinkel 20,606° und für den diagonalen halben Bildwinkel 25,174°. Somit zeigt bereits Zusammenhang (4-20), dass der Durchstoßpunkt außerhalb der Bildebene liegen muss, was jedoch keine Auswirkungen auf die Verwendung des Punktes als neuen Bezug für die radiale Verschiebung der Bildkoordinaten auf der Bildebene hat.

4.3.5 Berechnung relevanter Höhen

Anders als die in Kapitel 4.3.3 und 4.3.4 bestimmten Größen, die lediglich einmal für die Acrylglasplatte oder einmal für die verwendeten Kameras benötigt werden, sind die Berechnungen der Höhen, die für die Bestimmung des Brechungseinflusses benötigt werden, für jeden abgebildeten Bildpunkt der aufgenommen Bildsequenzen durchzuführen. In einem ersten Schritt wird für jeden Bildpunkt der Vektor vom Projektionszentrum einer jeden Kamera zum – ohne Berücksichtigung der Acrylglasplatte und daher fehlerhaft – berechneten dreidimensionalen Punkt der Signalisierung auf der Fahrzeugunterseite aufgestellt.

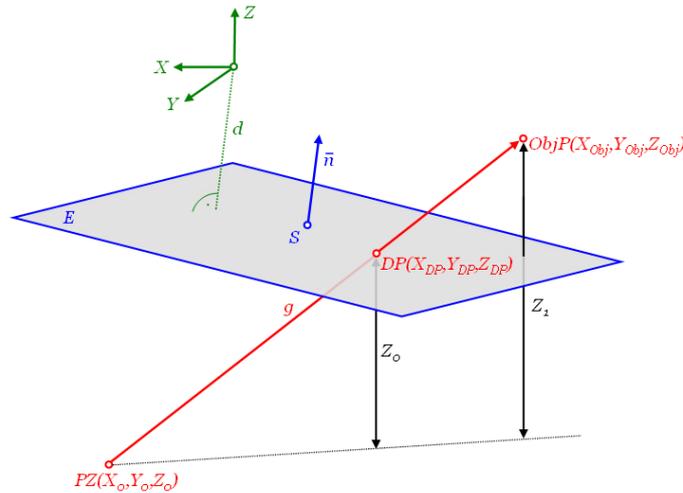


Bild 4-19

Geometrische Zusammenhänge zur Bestimmung relevanter Höhen

Darstellung der ausgeglichenen Trennebene (Schwerpunkt S und Normalenvektor \vec{n}) eines beispielhaften Abbildungsstrahls g vom Projektionszentrum PZ über den Durchstoßpunkt DP zum ObjektobjP.

Die Gerade g vom Projektionszentrum PZ zum ObjektobjP repräsentiert den Abbildungsstrahl zwischen den fehlerhaft gemessenen Bildkoordinaten und dem systematisch zu tief liegenden ObjektobjP. So kann über diese Gerade g und die im Kapitel 4.3.3 ausgeglichene Ebene für die Acrylglasplatte die genaue Höhe des Medieneintrittes für jeden Abbildungsstrahl, bezogen auf das Projektionszentrum der jeweiligen Kamera, bestimmt werden [Bild 4-19]. Hierfür werden für jeden aufgestellten Vektor die Eintrittspunktkoordinaten in die Acrylglasplatte berechnet. Über den Zusammenhang

$$t = \frac{d - (n_x \cdot X_o + n_y \cdot Y_o + n_z \cdot Z_o)}{n_x \cdot v_x + n_y \cdot v_y + n_z \cdot v_z} \quad \text{mit } d = n_x \cdot X_s + n_y \cdot Y_s + n_z \cdot Z_s \quad (4-21)$$

können mit der Geradengleichung

$$g: \begin{pmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad (4-22)$$

die Durchstoßpunkte der einzelnen Abbildungsstrahlen mit der Acrylglasplatte bestimmt werden. Der senkrechte Abstand Z_o zwischen der Unterseite der Acrylglasplatte und dem Projektionszentrum einer Kamera kann abschließend über die Differenz der Z -Koordinaten angegeben werden.

Neben der Höhe der Acrylglasplatte über dem Projektionszentrum ist die Höhe Z_I des jeweiligen Objektpunktes über dem Kamerastandpunkt relevant. Hier wird für eine erste Näherung die ohne Berücksichtigung der Brechungseigenschaften der Acrylglasplatte bestimmte dreidimensionale Koordinate genutzt und über die Differenz zur Z -Koordinate der äußeren Orientierung der Kamera die Höhe Z_I berechnet. Die durch diese Näherung benötigte iterative Anwendung des Korrekturverfahrens wird in Kapitel 4.4.3 vorgestellt.

Zeitschritt	Z_0 [mm]	Z_I [mm]
1	2893.78	3127.37
2	2893.31	3126.99
3	2892.84	3126.58
4	2892.36	3126.36
5	2891.89	3126.13
...

Tabelle 4-6 Ergebnisse für berechnete Höhen
Beispielhafte Ergebnisse für die berechneten Höhen Z_0 und Z_I .

Tabelle 4-6 zeigt beispielhaft berechnete Werte für die Höhen Z_0 und Z_I eines Punktes für unterschiedliche Zeitschritte. Die dargestellten Ergebnisse für Z_0 lassen eine systematische Verkleinerung der Höhe der Acrylglasplatte über dem Projektionszentrum der verwendeten Kamera vermuten, die aus der im Fotograbenkoordinatensystem nicht horizontal liegenden Acrylglasplatte resultiert.

Bild 4-20 stellt diesen Zusammenhang für weitere Zeitschritte der Bildsequenz graphisch dar. Die blauen Punkte visualisieren die Höhe des Durchstoßpunktes vom jeweiligen Abbildungsstrahl und der Acrylglasplatte. Diese Ergebnisse veranschaulichen die berechneten Parameter für die Orientierung der Acrylglasplatte im Raum [Tabelle 4-4]. Die leichte Neigung der dargestellten Linie resultiert aus dem nicht ganz senkrechten Normalenvektor. Die Zunahme der Punktdichte in Bewegungsrichtung lässt sich durch den Geschwindigkeitsabfall des beobachteten Fahrzeugpunktes durch den Aufprall beim Crashversuch erklären.

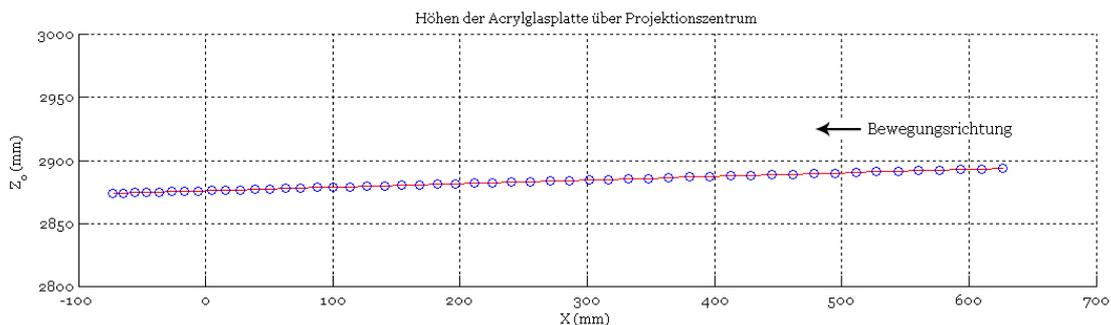


Bild 4-20 Höhen der Acrylglasplatte über dem Projektionszentrum
Darstellung von berechneten Höhen eines Punktes beobachtet aus einer Bildsequenz. Die Werte auf der X -Achse beschreiben die Bewegung des Punktes während der Bildsequenz. Die Z -Achse repräsentiert die jeweils berechnete Höhe der Acrylglasplatte über dem Projektionszentrum.

Für diesen Versuchsaufbau in der Fotogrube, mit der ungefähr horizontal gelagerten und planparallelen Acrylglasplatte, würden die Schwerpunktskoordinaten der ausgeglichenen Ebene für die Bestimmung der Höhe Z_0 für sämtliche Abbildungsstrahlen genügen. Von weitaus größerer

Bedeutung als die Höhe der Acrylglasplatte über dem Projektionszentrum sind die Auftreffwinkel der einzelnen Abbildungsstrahlen auf die Brechungsebene [Kapitel 4.3.6]. Grund hierfür ist, dass der Einfluss der Lichtbrechung auf die Bildkoordinatenmessung unabhängig davon ist, an welchem Ort sich die Scheibe im Strahlengang befindet. Relevant sind die gegenseitige Ausrichtung der Bild- und Brechungsebene, die optischen und geometrischen Eigenschaften der Acrylglasplatte [Kapitel 5.1.3] und die Auftreffwinkel der Abbildungsstrahlen auf die Platte. Um jedoch eine realitätsgetreue Modellierung des Zusammenhanges zu gewährleisten – die für Kontrollen in der späteren Implementierung des Algorithmus von Bedeutung ist – werden die in diesem Kapitel vorgestellten Parameter für sämtliche Abbildungsstrahlen berechnet.

4.3.6 Auftreffwinkel der Abbildungsstrahlen auf die Brechungsebene

In diesem Schritt der Auswertestrategie werden die Auftreffwinkel der einzelnen Abbildungsstrahlen auf die Acrylglasplatte berechnet, wie sie bereits beispielhaft in Bild 4-3 dargestellt sind.

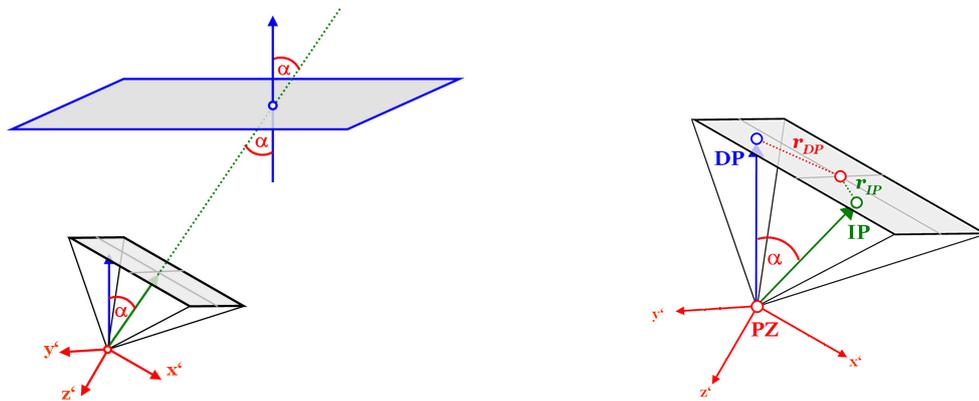


Bild 4-21 Geometrie zur Berechnung der Auftreffwinkel
Darstellung der geometrischen Zusammenhänge zur Berechnung der Auftreffwinkel. Links: Stufen- und Wechselwinkel des Auftreffwinkels; Rechts: Zusammenhänge im Bildraum.

Bild 4-21 zeigt die geometrischen Zusammenhänge, die für die Berechnung der Auftreffwinkel benötigt werden. Die linke Darstellung veranschaulicht die Übertragung des Auftreffwinkels vom Objektraum über den Wechselwinkel in den Bildraum. Im Bildraum kann der Auftreffwinkel als Winkel zwischen den Vektoren vom Projektionszentrum zum Durchstoßpunkt und vom Projektionszentrum zum fehlerhaft gemessenen Bildpunkt beschrieben werden [Bild 4-21 rechts].

Für die Berechnung des Winkels werden in einem ersten Schritt die Radien

$$\begin{aligned} r_{IP} &= \sqrt{x'^2 + y'^2} \\ r_{DP} &= \sqrt{x'_{DP}{}^2 + y'_{DP}{}^2} \end{aligned} \quad (4-23)$$

zu den Bildpunkten und dem Durchstoßpunkt, ausgehend vom Bildhauptpunkt, bestimmt. Über diese Radien und die kalibrierte Brennweite c lässt sich in einem zweiten Schritt die Länge des Vektors vom Projektionszentrum zum jeweiligen Bildpunkt und zum Durchstoßpunkt über

$$\begin{aligned}\overline{PZIP} &= \sqrt{r_{IP}^2 + c^2} \\ \overline{PZDP} &= \sqrt{r_{DP}^2 + c^2}\end{aligned}\quad (4-24)$$

bestimmen. Abschließend kann der Auftreffwinkel als Winkel zwischen den beiden aufgespannten Vektoren

$$\begin{aligned}\vec{v}_{IP} &= \left(x'_{IP} \quad y'_{IP} \quad \overline{PZIP} \right)^T \\ \vec{v}_{DP} &= \left(x'_{DP} \quad y'_{DP} \quad \overline{PZDP} \right)^T\end{aligned}\quad (4-25)$$

über

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{v}_{IP} \cdot \vec{v}_{DP}}{|\vec{v}_{IP}| \cdot |\vec{v}_{DP}|} \right)\quad (4-26)$$

berechnet werden. Somit stehen alle benötigten Informationen zur Bestimmung der radialen Verschiebung im Objektraum [Kapitel 4.3.7] zur Verfügung.

4.3.7 Radiale Verschiebung im Objektraum

Neben den bisher bestimmten Parametern wird zur Berechnung der radialen Verschiebung im Objektraum der Brechungswinkel β , der über das Brechungsgesetz von SNELLIUS und der daraus resultierenden Formel (3-6) bestimmt wird, benötigt.

Über die Kombination der Zusammenhänge (3-2), (3-3) und (3-8) ergibt sich deren Einfluss im Objektraum zu

$$\Delta R = \tan \alpha \cdot Z_1 - \left(\tan \alpha \cdot Z_0 + \tan \beta \cdot d + \tan \alpha \cdot (Z_1 - (Z_0 + d)) \right)\quad (4-27)$$

und unterscheidet sich somit nicht von der Berechnung der radialen Objektraumverschiebung für den vorgestellten Sonderfall in Kapitel 3.2.

4.3.8 Korrekturwerte für die Bildkoordinaten

Im letzten Teilschritt der Auswertung wird der im Objektraum bestimmte radiale Versatz (4-27) in den Bildraum umgerechnet und als Korrekturterme $\Delta x'$ und $\Delta y'$ auf die jeweiligen Bildkoordinaten angewandt. Neben dem Bezug des radialen Fehlers auf den neu bestimmten Bezugspunkt [Kapitel 4.3.4] ist darauf zu achten, dass eine Umrechnung auf die Bildebene über den Abbildungsmaßstab c/Z_1 – wie in dem vorgestellten Sonderfall [Kapitel 3.2] – zu fehlerhaften Korrekturwerten führt. Dieser Fehlereinfluss wird wie folgt korrigiert:

Zunächst wird die radiale Verschiebung über

$$\Delta r' = \Delta R \cdot \frac{\sqrt{r_{DP}^2 + c^2}}{Z_1}\quad (4-28)$$

auf eine Ebene umgerechnet, die im Durchstoßpunkt gelagert ist und parallel zur Brechungsebene liegt [Bild 4-22 links].

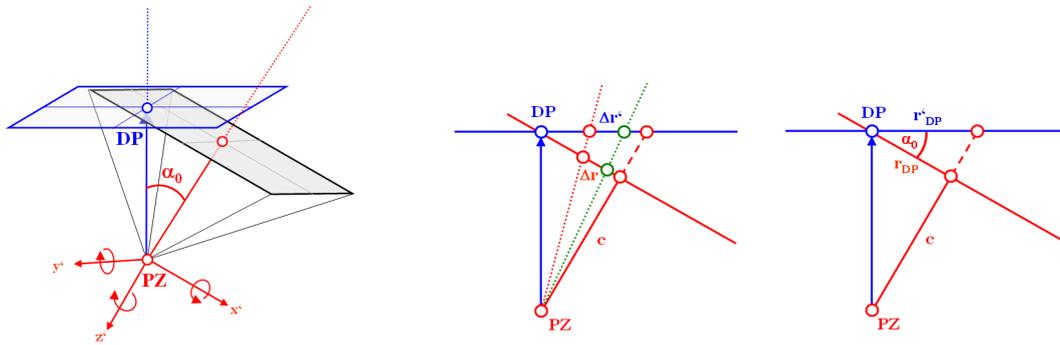


Bild 4-22

Skalierungsfaktor für Umrechnung auf Bildebene

Links: Darstellung der Ebene durch den Durchstoßpunkt auf die sich die Korrektur anfangs bezieht; Mitte: Radialer Fehler auf falscher Ebene; Rechts: Benötigte Informationen für die Berechnung des Skalierungsfaktors.

Bild 4-22 Mitte veranschaulicht, dass der so berechnete radiale Fehler um einen bestimmten Faktor größer ist, als der radiale Fehler auf der Sensorebene. Die einzige Ausnahme bildet der Sonderfall, bei dem die Vektorlänge vom Projektionszentrum zum Durchstoßpunkt der Kamera konstanten c entspricht und die radialen Fehler über c/Z_1 in den Bildraum übertragen werden können. Für den allgemeinen Fall wird ein Skalierungsfaktor bestimmt, der abhängig vom Auftreffwinkel der optischen Achse auf die Brechungsebene ist. Dieser Winkel wird über den Blickrichtungsvektor und den Normalenvektor der Acrylglasplatte mit dem Zusammenhang

$$\alpha_0 = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{b} \cdot \vec{n}}{|\vec{b}| \cdot |\vec{n}|} \right) \quad (4-29)$$

berechnet. Anschließend wird der Radius vom Bildhauptpunkt zum Durchstoßpunkt über

$$r'_{DP} = \frac{r_{DP}}{\cos \alpha_0} \quad (4-30)$$

auf die im Durchstoßpunkt gelagerte Ebene umgerechnet [Bild 4-22 rechts]. Der Quotient dieser beiden Werte bildet den Skalierungsfaktor, so dass die in der Durchstoßpunktebene bestimmte radiale Verschiebung $\Delta r'$ über

$$\Delta r = \frac{r'_{DP}}{r_{DP}} \cdot \Delta r' \quad (4-31)$$

auf die gekippte Bildebene umgerechnet werden kann.

Tabelle 4-7 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für die Auftreffwinkel der optischen Achsen der unterschiedlichen Kameras auf die Acrylglasplatte und die, aus diesem Winkel resultierenden Skalierungsfaktoren für die Umrechnung des radialen Fehlers auf die gekippte Bildebene.

Kamera	Auftreffwinkel optische Achse auf Acrylglas α_0	Skalierungsfaktor
U1	0.295°	0.999988
U2	35.480°	0.814319
U3	21.375°	0.931215

Tabelle 4-7

Auftreffwinkel und Skalierungsfaktoren

Beispielhafte Ergebnisse für die Auftreffwinkel der optischen Achsen auf die Acrylglasplatte und für die Skalierungsfaktoren für die Umrechnung der radialen Verschiebung auf die gekippte Bildebene.

Die Korrektur der Bildkoordinaten erfolgt anschließend, ähnlich wie bei der Korrektur der radial-symmetrischen Verzeichnung [LUHMANN, 2000 – S. 120], proportional nach:

$$\begin{aligned}\Delta x' &= (x' - x'_{DP}) \cdot \frac{\Delta r}{r_{IPDP}} && \rightarrow x'_{korr} = x' - \Delta x' \\ \Delta y' &= (y' - y'_{DP}) \cdot \frac{\Delta r}{r_{IPDP}} && \rightarrow y'_{korr} = y' - \Delta y'\end{aligned}\quad (4-32)$$

$$\text{mit } r_{IPDP} = \sqrt{(x' - x'_{DP})^2 + (y' - y'_{DP})^2}$$

Der Unterschied zur Anwendung der radial-symmetrischen Verzeichnung als Korrekturterme für die Bildkoordinaten liegt in dem neu berechneten Bezugspunkt, der an dieser Stelle den Bildhauptpunkt ersetzt. So wird die Differenz zwischen den jeweiligen Bildkoordinaten und den Koordinaten des neuen Bezugspunktes gebildet. Des Weiteren werden die Radien der einzelnen Bildkoordinaten bezogen auf diesen Bezugspunkt bestimmt und für die proportionale Verteilung des radialen Fehlers verwendet.

4.3.9 Simulationssoftware und Zusammenfassung

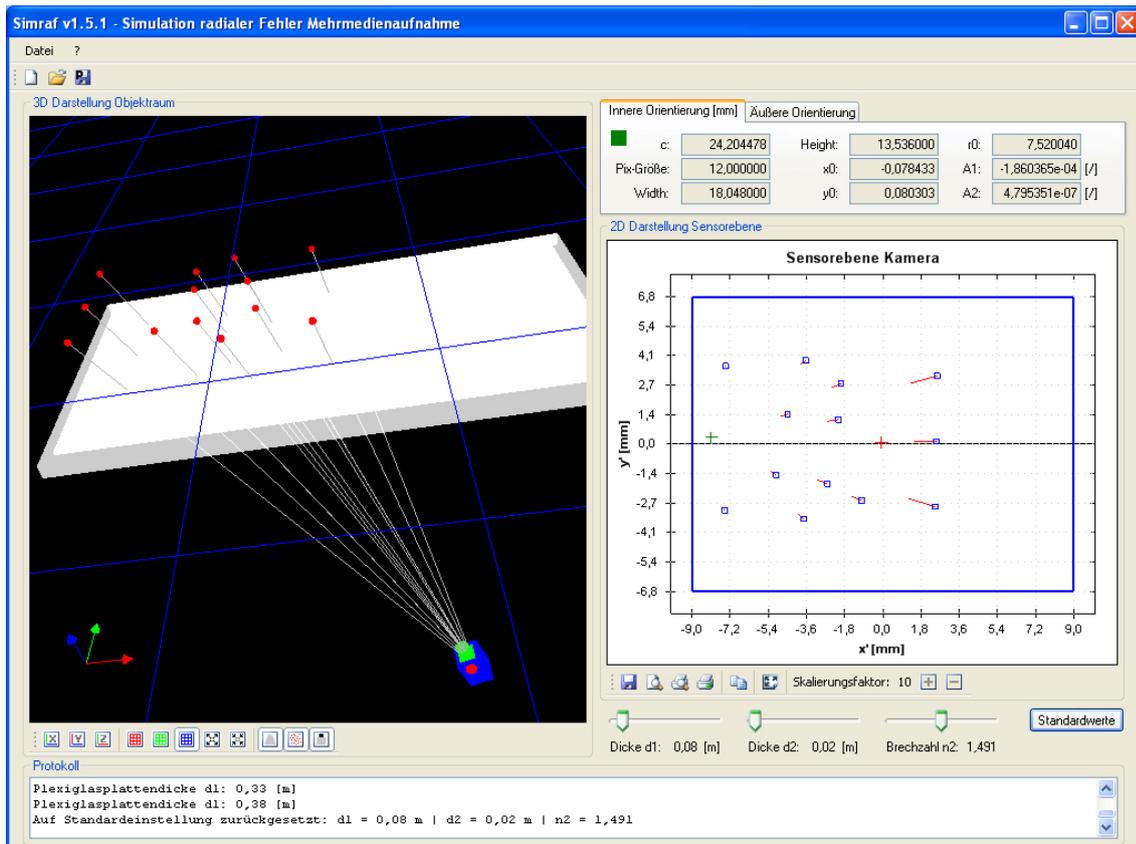


Bild 4-23 Programmoberfläche Simulationssoftware
 Beispielhafte Punktwolke im Objektraum (links) und zugehörige Bildkoordinaten mit Residuen bezogen auf den neuen Bezugspunkt für die dargestellte Kamera (rechts).

Für die Darstellung der vorgestellten theoretischen Zusammenhänge zwischen einem Medium im Strahlengang und dessen Auswirkungen auf die Bildkoordinatenmessung konnte im Rahmen vorliegender Arbeit eine Simulationssoftware entwickelt werden. Diese veranschaulicht die Zusammenhänge durch eine Visualisierung der Situation im dreidimensionalen Objektraum und der gleichzeitigen Darstellung der jeweiligen Korrekturterme als Residuen auf der zweidimensionalen Bildebene.

Bild 4-23 zeigt die Oberfläche des Simulationsprogramms. Die dreidimensionale Darstellung der verwendeten Kameras, des Brechungsmediums und der Objektpunktwolke sind mit der 3D Grafik Bibliothek OpenGL implementiert worden. Zusätzlich ist eine zweidimensionale Darstellung der Bildebene realisiert, auf der, neben dem Bildhauptpunkt und den Bildkoordinaten des neu definierten Bezugspunktes für die radiale Verschiebung, die Residuen angezeigt werden. Die Parameter der Acrylglaseigenschaften können so variiert werden, dass deren Änderungen im Objektraum und die damit verbundenen Einflüsse auf die Bildebene direkt dargestellt werden. Dieses Tool dient jedoch lediglich der visuellen Anschauung des Zusammenhangs und ist in der jetzigen Form nicht für den Einsatz des entwickelten Verfahrens im operativen Geschäft geeignet.

Das in den Kapiteln 4.3.3 bis 4.3.8 vorgestellte entwickelte Verfahren zur Berücksichtigung der Einflüsse einer Brechungsebene im Strahlengang liefert als Ergebnis Korrekturterme $\Delta x'$ und $\Delta y'$ für jeden auf der Bildebene abgebildeten Objektpunkt. Durch die Anwendung dieser Korrekturterme auf die jeweils gemessenen Bildkoordinaten ist das Modell der Zentralperspektive, unabhängig von der gegenseitigen Ausrichtung der Bild- und Brechungsebene, wieder herstellbar. Die bekannten Algorithmen zur Kamerapositionierung und dreidimensionale Punktbestimmung, die auf diesem Modell basieren, können so nach der Korrektur der Bildkoordinaten wieder verwendet werden, ohne systematische Fehler zu verursachen.

4.4 Integration in die Filmauswertung

Für den operationellen Einsatz des entwickelten Verfahrens [Kapitel 4.3] bei der dreidimensionalen Filmauswertung von Sicherheitsversuchen, muss dieses in die laufenden Prozesse einer Filmauswertung integriert werden. In Bild 4-24 ist die umgesetzte Integration des entwickelten Korrekturverfahrens in die Filmauswertung schematisch dargestellt.

Zunächst wird eine dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite im Fotogrubenkoordinatensystem ohne Berücksichtigung der Acrylglasplatte mit der Auswertesoftware FalCon eXtra durchgeführt [Kapitel 4.4.1]. Als relevante Eingangsinformationen dienen die synchron aufgezeichneten Versuchsfilm, die Koordinaten der Passpunkte in der Fotogrube und der Fahrzeugpunkte im Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 , sowie die inneren Orientierungen der verwendeten Kameras. Als Ergebnis liefert die dreidimensionale Filmauswertung unter anderem eine ASCII Exportdatei, die neben den Kameraorientierungen, die dreidimensionalen Koordinaten der Punkte auf der Acrylglasplatte und die fehlerhaften Bild- und Objektkoordinaten der Fahrzeugunterseite enthält. Die entwickelte Optimierungssoftware *KorAS* [Kapitel 4.4.2] verarbeitet diese Informationen und korrigiert die Bildkoordinaten nach dem vorgestellten Verfahren. Die von den Einflüssen der Acrylglasplatte bereinigten Bildkoordinaten

werden anschließend über eine ASCII Datei in das Programm FalCon eXtra importiert und für eine erneute dreidimensionale Auswertung verwendet. Die Punkte auf der Fahrzeugunterseite können so ohne den Fehlereinfluss der Acrylglasplatte im Strahlengang trianguliert werden. In den folgenden Kapiteln werden die genannten Arbeitsschritte genauer vorgestellt.

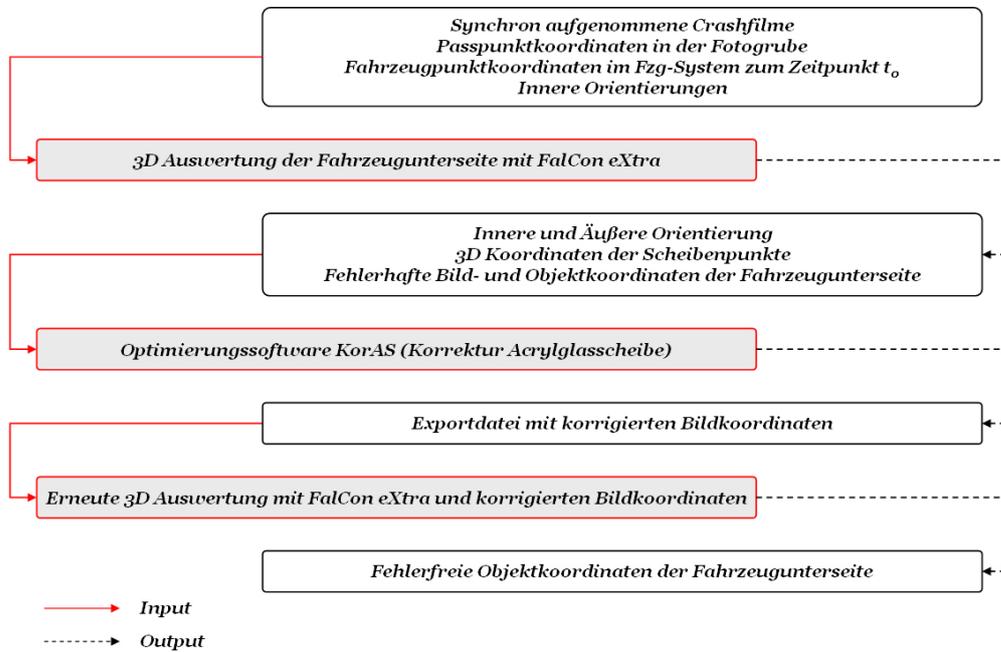


Bild 4-24 Strategie zur Integration in den Auswerteprozess
Schematische Darstellung zur Integration des entwickelten Verfahrens in die verwendeten Abläufe und Systeme.

4.4.1 Durchführung einer dreidimensionalen Filmauswertung

Die Filmauswertung wird mit dem Programmsystem FalCon eXtra, welches Module für die Kamerakalibrierung, die zweidimensionale und die dreidimensionale Auswertung zur Verfügung stellt, durchgeführt. Da die dreidimensionale Filmauswertung im Fokus dieser Arbeit steht, wird an dieser Stelle bewusst nicht auf alle verwendeten Module eingegangen.

Für eine dreidimensionale Auswertung ist ein schematischer Auswertebauablauf einzuhalten, der sich anschaulich über ein Ablaufdiagramm beschreiben lässt [Bild 4-25].

Während der Versuchsvorbereitung werden relevante Fahrzeugpunkte mit Messmarken signalisiert und über photogrammetrische Verfahren im Fahrzeugkoordinatensystem hochgenau vermessen. So stehen zum Zeitpunkt t_0 , also vor der Deformation der Fahrzeugstruktur, die dreidimensionalen Koordinaten der Messmarken im Fahrzeugkoordinatensystem zur Verfügung. Des Weiteren werden im Vorfeld die verwendeten Kameras kalibriert, um die genaue Aufnahmegeometrie für die anschließende dreidimensionale Auswertung rekonstruieren zu können [Kapitel 2.2.2]. Die photogrammetrische Auswertung der Versuchsfilme beginnt mit der Bestimmung der äußeren Orientierung [Kapitel 2.2.3] der Kameras in dem definierten Fotograbenkoordinatensystem [Kapitel 4.2.3]. Hierzu werden die Bildkoordinaten der Passpunkte

durch manuelles Einschränken der Suchbereiche zum Zeitpunkt t_0 gemessen. Über einen räumlichen Rückwärtsschnitt [Kapitel 2.2.5] werden die Positionen und Orientierungen der Kameras im Fotogrubenkoordinatensystem bestimmt. Bei instabilen Kamerapositionen werden die Bildkoordinaten der Passpunkte über die gesamte Bildsequenz beobachtet, so dass die Parameter der äußeren Orientierung für jeden Zeitschritt der Aufnahme berechnet werden können. Nach erfolgreicher Positionierung und Orientierung der Kameras werden die Bildkoordinaten der Messmarken am Fahrzeug über automatische Punktverfolgungsalgorithmen für jeden Zeitpunkt der Bildsequenz gemessen. Durch eine Vielzahl von Störeffekten, die durch den Aufprall des Fahrzeugs verursacht werden und eine eindeutige und genaue Zuordnung der Markenmitte automatisch nicht mehr möglich machen, ist an dieser Stelle ein hoher manueller Messaufwand erforderlich.

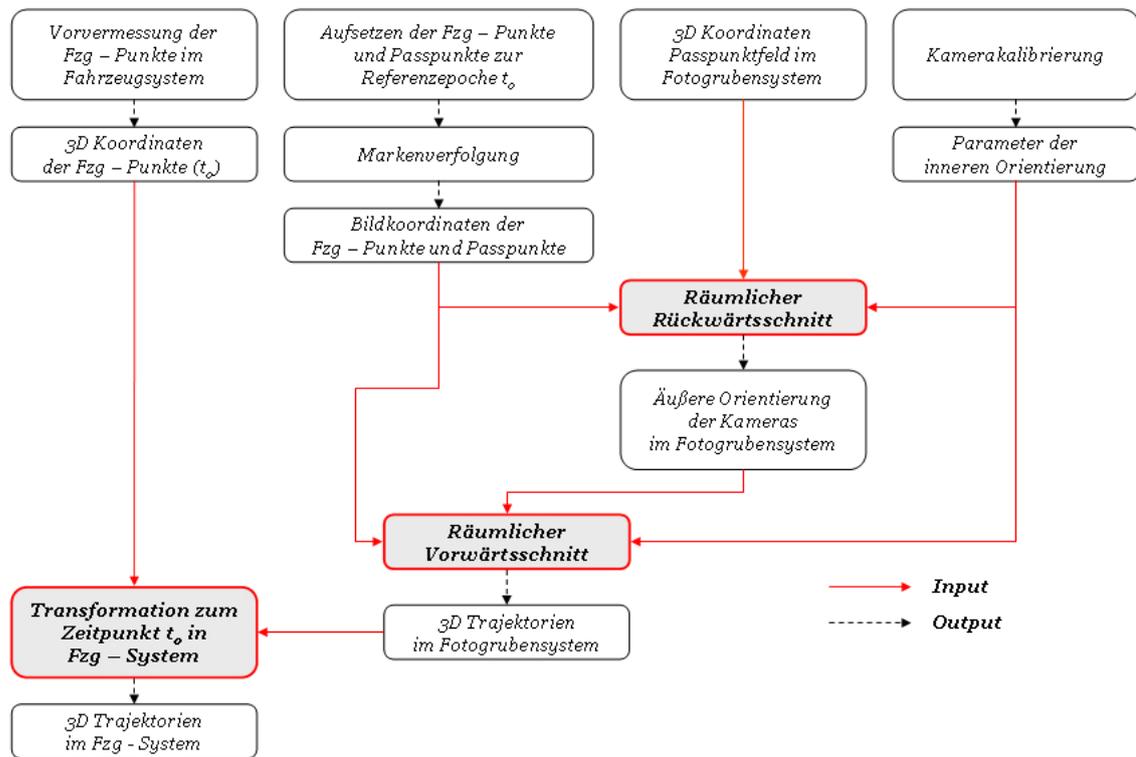


Bild 4-25 **Ablaufdiagramm Filmauswertung**
Schematische Darstellung einer Filmauswertung im Ablaufdiagramm.

Anschließend werden, über die gemessenen Bildkoordinaten und die Parameter der inneren und äußeren Orientierung der Kameras, die dreidimensionalen Koordinaten der Fahrzeugpunkte bezogen auf das Fotogrubenkoordinatensystem über einen räumlichen Vorwärtsschnitt [Kapitel 2.2.6] bestimmt. Da diese Koordinatenbestimmung für jeden Zeitschritt der Bildsequenzen durchgeführt wird, können dreidimensionale Trajektorien der Fahrzeugpunkte, die das räumliche Verhalten der Messmarken über die Aufnahmezeit beschreiben, konstruiert werden.

Als Ergebnis der dreidimensionalen Auswertung werden, bis auf die Acrylglaseigenschaften, alle relevanten Informationen für die Korrektur der Bildkoordinaten in einer erzeugten ASCII Exportdatei zur Verfügung gestellt.

4.4.2 Implementierung der Optimierungssoftware *KorAS*

Die entwickelte Optimierungssoftware [Bild 4-26] liefert eine Schnittstelle zur Auswertesoftware FalCon eXtra, die die Informationen der zuvor durchgeführten dreidimensionalen Filmauswertung [Kapitel 4.4.1] analysiert und sämtliche, für die Korrektur relevanten, Daten bereitstellt. So werden zum Beispiel nur die gemessenen Bildkoordinaten, zu denen in einer anderen Ansicht homologe Punkte existieren, berücksichtigt. Die zu verwaltende Datenmenge kann so erheblich reduziert werden. An einem Beispiel veranschaulicht können von 12.561 gemessenen Bildkoordinaten einer Bildsequenzauswertung 3.927 Koordinaten vernachlässigt werden, da zu diesen keine homologen Punkte in anderen Ansichten existieren und sie somit für die Bestimmung der 3.932 triangulierten Objektpunkte nicht verwendet werden. Des Weiteren wird eine Fallunterscheidung für sämtliche dreidimensionalen Punkte vorgenommen, um zu kontrollieren, ob die Punkte unterhalb oder oberhalb der Acrylglasplatte liegen und so beeinflusst oder unbeeinflusst von den Brechungseigenschaften derselben sind.

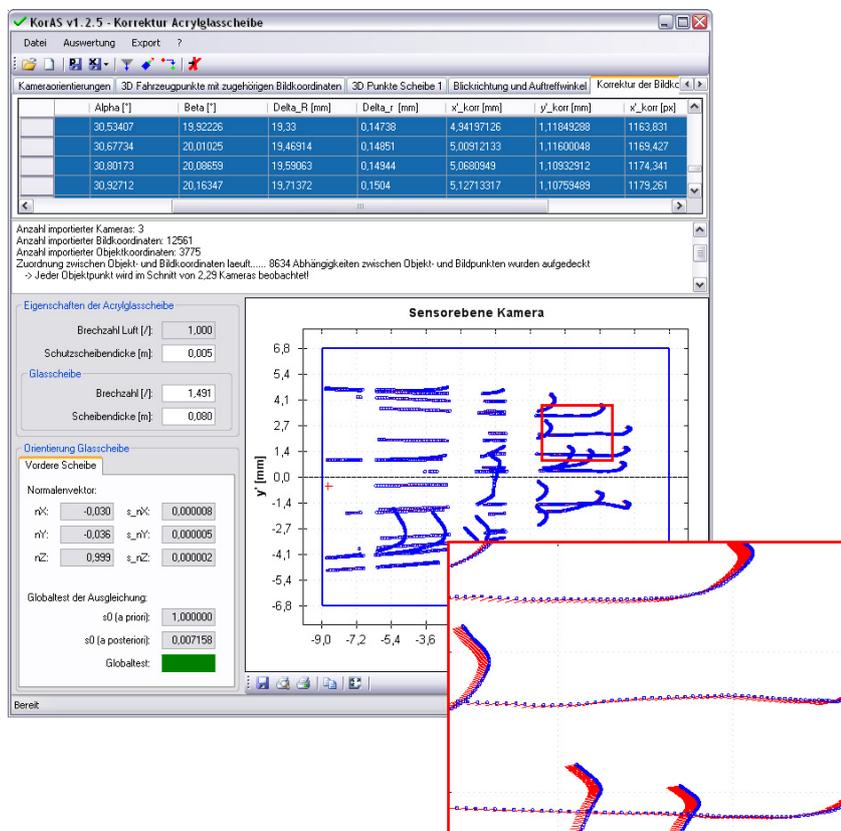


Bild 4-26 *Oberfläche Optimierungssoftware KorAS*
Darstellung der Oberfläche des entwickelten Tools für die Korrektur der Bildkoordinaten. In der vergrößerten Ansicht sind die Residuen (rot) bezogen auf den Durchstoßpunkt genauer zu erkennen.

Nach diesen Analysen der Exportdatei stehen die relevanten Daten in der Datenstruktur

Punkt ID | Bildnummer | X Y Z | Kamera ID | x' y' | Kamera ID | x' y' | ...

zur Verfügung und könnten so direkt für die Verknüpfungstabelle der Bündelausgleichung, die angibt, welcher Punkt in welchem Bild gemessen wird [LUHMANN, 2000 – S. 263], genutzt wer-

den. Über einen XML Export können die Daten in dieser Struktur darüber hinaus auch anderen Fachanwendungen zur Verfügung gestellt werden.

Des Weiteren ist an dieser Stelle eine Transformation vom linkshändigen Pixelkoordinatensystem in das rechtshändige Bildkoordinatensystem erforderlich. Die Exportdatei des Auswerteprogramms liefert die gemessenen Bildpunkte entweder in Pixel- oder in Bildkoordinaten, die jedoch nur mit drei Nachkommastellen besetzt sind. Um die Auflösung von einem Hundertstel Pixel auch in dem benötigten Bildkoordinatensystem zu erhalten, werden die gemessenen Bildpunkte in Pixelkoordinaten exportiert und über

$$\begin{aligned} x'_{[mm]} &= \left(x_{[px]} \cdot \text{Pixelgröße} \right)_{[mm]} - \frac{\text{Bildbreite}_{[mm]}}{2} \\ y'_{[mm]} &= \text{Bildhöhe}_{[mm]} - \left(y_{[px]} \cdot \text{Pixelgröße} \right)_{[mm]} - \frac{\text{Bildhöhe}_{[mm]}}{2} \end{aligned} \quad (4-33)$$

ohne Auflösungsverlust in Bildkoordinaten mit fünf Nachkommastellen transformiert. Die Parameter der inneren Orientierung werden erst bei der Triangulation berücksichtigt und können von daher bei dieser Umrechnung vernachlässigt werden.

Nachdem nun alle relevanten Informationen zur Verfügung stehen, wird die Korrektur der einzelnen Bildkoordinaten für jeden Zeitschritt der aufgezeichneten Bildsequenzen gemäß dem in Kapitel 4.3 hergeleiteten Verfahren durchgeführt. Wie in Bild 4-26 dargestellt, liefert die erstellte Optimierungssoftware neben den numerischen Werten eine graphische Darstellung der Sensorebene mit den zweidimensionalen Trajektorien der gemessenen Bildkoordinaten. Zudem ist der neu berechnete Bezugspunkt visualisiert, auf den sich die ebenfalls abgebildeten Korrekturwerte als Residuen beziehen. Diese Visualisierung der Bildebene dient als einfache und intuitive Plausibilitätskontrolle der durchgeführten Korrekturen. Abschließend werden die korrigierten Bildkoordinaten in Pixelkoordinaten zurück transformiert und als ASCII Dateien in einem FalCon eXtra kompatiblen Format für die weitere Auswertung bereitgestellt. So können die gemessenen Bildkoordinaten aus der durchgeführten Filmauswertung [Kapitel 4.4.1] durch die korrigierten Bildkoordinaten ersetzt werden.

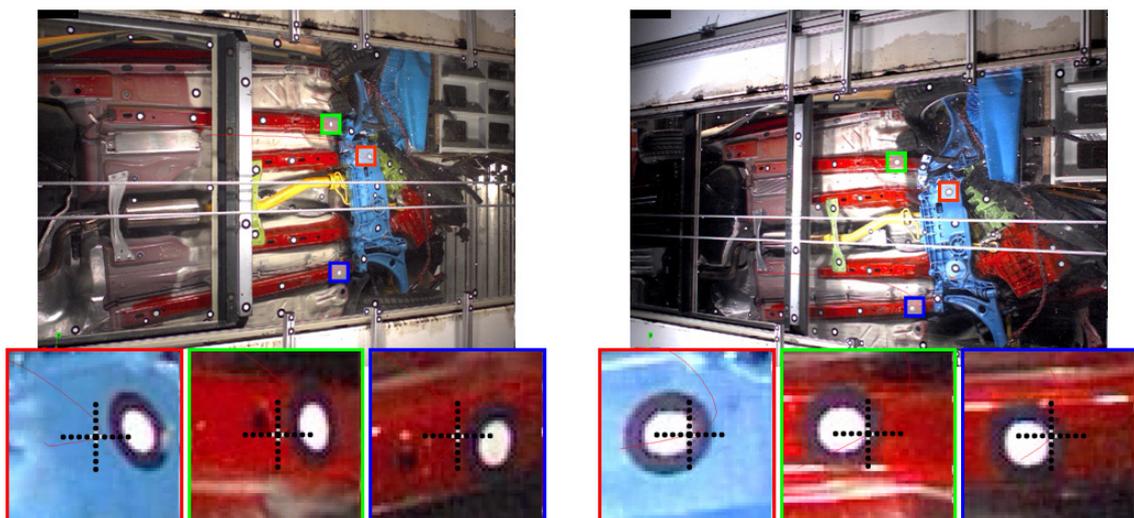


Bild 4-27 **Korrigierte Bildkoordinaten**
Beispielhafte Darstellung der korrigierten Bildkoordinaten für die Kameraansichten U2 und U3.

Bild 4-27 zeigt beispielhaft nach der Korrektur importierte Bildkoordinaten für die Kameraansichten U2 und U3. Der Versatz zur Markenmitte stellt den radialen Fehler bezogen auf den neuen Bezugspunkt dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass aus größeren Auftreffwinkeln der Abbildungsstrahlen größere radiale Verschiebungen der Bildkoordinaten resultieren. Da die benötigten Kamerapositionen im Fotogrubenkoordinatensystem bereits bekannt sind, kann direkt eine erneute dreidimensionale Auswertung mit den, vom Fehlereinfluss der Acrylglasplatte bereinigten, Bildkoordinaten durchgeführt werden. Die Berücksichtigung der Brechungseigenschaften der Fotogrubenabdeckung wird so vom Bildraum in den Objektraum getragen.

Stehen die fehlerbereinigten Objektkoordinaten der Fahrzeugpunkte zur Verfügung, wird abschließend eine räumliche Koordinatentransformation der Fahrzeugpunkte vom Fotogrubenkoordinatensystem in das Fahrzeugkoordinatensystem durchgeführt. Als Passpunkte werden hier die Fahrzeugpunkte zum Zeitpunkt t_0 genutzt, die im Fahrzeugkoordinatensystem durch die Vorvermessung und im Fotogrubenkoordinatensystem durch die Filmauswertung bekannt sind. Die Intention dieser Transformation ist, dass die Messergebnisse der optischen Sensorik im gleichen Bezugssystem wie die durchgeführten Simulationsberechnungen zur Verfügung stehen.

4.4.3 Iterative Anwendung des Verfahrens

Bei der Berechnung der relevanten Höhen [Kapitel 4.3.5] zur Bestimmung des Einflusses der Acrylglasplatte werden die einzelnen Abbildungsstrahlen in einer ersten Annahme über das Projektionszentrum und die fehlerhaft gemessenen Objektpunkte definiert. Hieraus ergibt sich eine Höhe des jeweiligen Punktes über dem Projektionszentrum, die um den Einfluss der Acrylglasplatte systematisch zu tief liegt [Kapitel 4.3.1]. Wie groß der Fehlereinfluss dieser ersten Annahme auf die dreidimensionale Punktbestimmung ist, kann über eine iterative Anwendung des entwickelten Verfahrens geprüft werden.

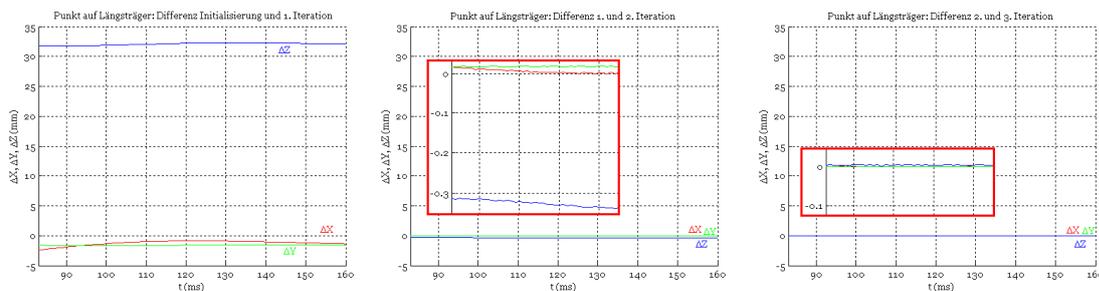


Bild 4-28 **Differenzen zwischen den Iterationsschritten**
Darstellung der Differenzen zwischen den einzelnen Iterationsschritten für einen Punkt auf dem Längsträger. Links: Erste Anwendung des Verfahrens; Mitte: Anwendung mit den Ergebnissen aus der linken Darstellung; Rechts: Anwendung mit den Ergebnissen aus der mittleren Darstellung.

Bild 4-28 visualisiert die Differenzen zwischen den Ergebnissen nach den einzelnen Iterationsschritten. Die linke Darstellung zeigt die Differenzen zwischen den Ergebnissen ohne Berücksichtigung der Acrylglasplatte und nach der ersten Anwendung des Verfahrens. Wie zu erkennen ist, wirkt sich der Einfluss der Acrylglasplatte mit bis zu 33 mm vor allem in Z-Richtung aus. In X- und Y-Richtung liegt der Einfluss bei diesem Punkt bei maximal 3 mm. Nach der ersten Korrektur ist die Differenz zwischen den einzelnen Ergebnissen deutlich geringer. In Z-Richtung ist der Einfluss mit maximal 0,35 mm weiter am Größten. Bild 4-28

rechts zeigt, dass die Differenzen nach einem weiteren Iterationsschritt nahezu zu Null werden. Dieses Verhalten konnte für sämtliche Punkte auf der Fahrzeugunterseite nachgewiesen werden.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen lässt sich festhalten, dass eine iterative Anwendung des Verfahrens für eine realitätsgetreue Modellierung und sehr hohe Genauigkeitsanforderungen bei der Auswertung von Bedeutung ist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Auswertefolge sehr schnell konvergiert und daher nur wenige Iterationsschritte bis zu einer konvergierenden Lösung notwendig sind. Für die dreidimensionale Filmauswertung von Crashversuchen, bei der eine Objektpunktgenauigkeit von 5 mm gefordert wird, reicht jedoch die einfache Anwendung des Verfahrens aus.

4.4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel ist neben dem Überblick über die Auswerteabläufe von dreidimensionalen Filmauswertungen eine Strategie zur Integration des entwickelten Verfahrens [Kapitel 4.3] in die Auswertung erläutert worden. Zusätzlich zur Integrationsstrategie [Bild 4-24] wird die Umsetzung durch die entwickelte Optimierungssoftware *KorAS* vorgestellt worden [Bild 4-26]. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass für die geforderte Genauigkeit bei der Filmauswertung der Fahrzeugunterseite keine iterative Anwendung des Verfahrens erforderlich ist. Abweichungen von maximal 0,35 mm in *Z* – Richtung zwischen dem ersten und dem zweiten Iterationsschritt sind vernachlässigbar klein. Mit den Ergebnissen aus den Kapiteln 4.2, 4.3 und 4.4 steht somit ein, im operativen Geschäft einsetzbares Verfahren für die dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite zur Verfügung.

4.5 Modellerweiterung um eine zusätzliche Acrylglasplatte

In Bild 4-10 sind die Aufnahmen der eingesetzten Kameras in der Fotogrube für einen Crash mit Deformationsbarriere dargestellt. Besonders in den beiden Schrägansichten lässt sich erkennen, dass die Fahrzeugunterseite bei dieser Crashart durch zwei verschiedene Acrylglasplatten, die durch eine Strebe miteinander verbunden sind, beobachtet wird. Für die bisher dargelegten Überlegungen sind für beide Acrylglasplatten vereinfachend dieselben Parameter für die optischen und geometrischen Eigenschaften und für die Orientierung im Raum angenommen worden. In Bild 4-29 sind nun die realen Gegebenheiten bei der Beobachtung der Fahrzeugunterseite in diesem Fall schematisch dargestellt. Demnach ist die linke der beiden Acrylglasplatten wesentlich dünner als die rechte Abdeckplatte. Zudem ist eine leicht unterschiedliche Orientierung der Platten im Raum nicht auszuschließen. Diese Umstände machen eine separate Berücksichtigung beider Acrylglasplatten im Strahlengang erforderlich. Es muss für jeden Abbildungsstrahl geprüft werden, ob er durch die linke oder rechte Acrylglasplatte verläuft und welcher plattenspezifische Korrekturparametersatz für die Beseitigung des Brechungseinflusses verwendet werden muss.

Eine solche Fallunterscheidung im Objektraum durchzuführen, ist generell über Ray-Tracing Verfahren – wie zum Beispiel in [HINZ, 2004] zur Berechnung von sichtbaren Rasterelementen eines Digitalen Höhenmodells in Luftbildern erläutert – möglich, jedoch recht aufwendig. So

müsste für jeden Objektpunkt geprüft werden, ob er auf der jeweiligen Kamera sichtbar ist oder durch die Strebe verdeckt wird und in einem weiteren Schritt, ob er links oder rechts an der Strebe vorbei abgebildet wird. Eine einfachere Lösung bietet die Fallunterscheidung auf der Bildebene. Hierfür sind Messmarken an die Unterseite der sich zwischen den Platten befindlichen Strebe angebracht worden [Bild 4-10]. Über die Bildkoordinaten dieser Punkte auf dem jeweiligen Sensor kann eine einfache zweidimensionale Fallunterscheidung durchgeführt werden. Hierfür muss geprüft werden, ob der zu korrigierende Bildpunkt links oder rechts der aus den Strebenpunkten resultierenden Geraden liegt [Bild 4-30].

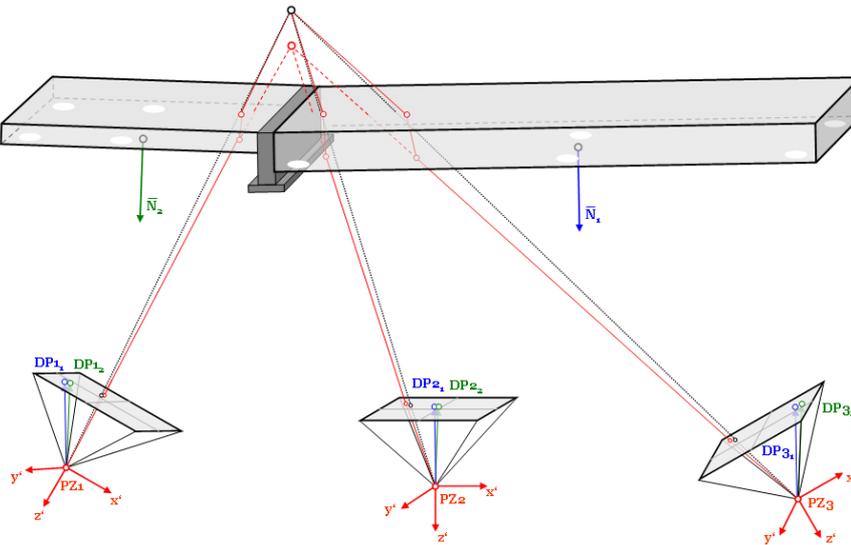


Bild 4-29 **Triangulation durch zwei Acrylglasplatten**
Darstellung beider Acrylglasplatten, der verbindenden Strebe und der drei Kamerapositionen.

Für die Integration dieser Überlegungen in die Auswertung sind auf die linke Acrylglasplatte ebenfalls Messmarken geklebt worden, deren dreidimensionale Punkt看ke durch eine optimale Ebene parametrisiert werden kann [Kapitel 4.3.3]. Jede Acrylglasplatte erhält so eine separate Orientierung im Strahlengang und hieraus resultierend einen separaten neuen Bezugspunkt für die radiale Verschiebung [Kapitel 4.3.4]. Tabelle 4-8 zeigt beispielhaft für die Kameraposition U2 diese unterschiedlichen Korrekturparameter bezüglich der Orientierung der jeweiligen Acrylglasplatte im Strahlengang, die daraus resultierenden unterschiedlichen Bezugspunkte für die radiale Verschiebung und die unterschiedlichen Auftreffwinkel der optischen Achsen auf die jeweilige Fotograbenabdeckung.

Normalenvektor 1		Durchstoßpunkt 1		Normalenvektor 2		Durchstoßpunkt 2	
\hat{n}_{x_1}	= -0.030	DP_{x_1}	= 14.24997 mm	\hat{n}_{x_2}	= -0.019	DP_{x_2}	= 13.92744 mm
\hat{n}_{y_1}	= -0.036	DP_{y_1}	= -1.22862 mm	\hat{n}_{y_2}	= -0.035	DP_{y_2}	= -1.18003 mm
\hat{n}_{z_1}	= 0.999	α_{o_1}	= 35.47500 °	\hat{n}_{z_2}	= 0.999	α_{o_2}	= 34.85234 °

Tabelle 4-8 **Korrekturparametersätze für beide Acrylglasplatten**
Beispielhafte Ergebnisse für die Normalenvektoren der jeweiligen Scheibe und der daraus resultierenden neuen Bezugspunkte für die Kameraposition U2. Zusätzlich sind die unterschiedlichen Auftreffwinkel der optischen Achse auf die jeweilige Acrylglasplatte angegeben.

Durch diese Fallunterscheidung lässt sich für jeden Bildpunkt auf einfache Weise der richtige Parametersatz zur Korrektur des jeweiligen Brechungseinflusses der durchlaufenen Acrylglasplatte verwenden. Die vergrößerten Darstellungen in Bild 4-30 zeigen für die Residuen der Bildkoordinaten links und rechts von der Strebe leicht unterschiedliche Orientierungen und Skalierungen, obwohl die Auftreffwinkel der jeweiligen Abbildungsstrahlen in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Diese Unterschiede sind auf die entsprechend verwendeten Korrekturparametersätze zurückzuführen.

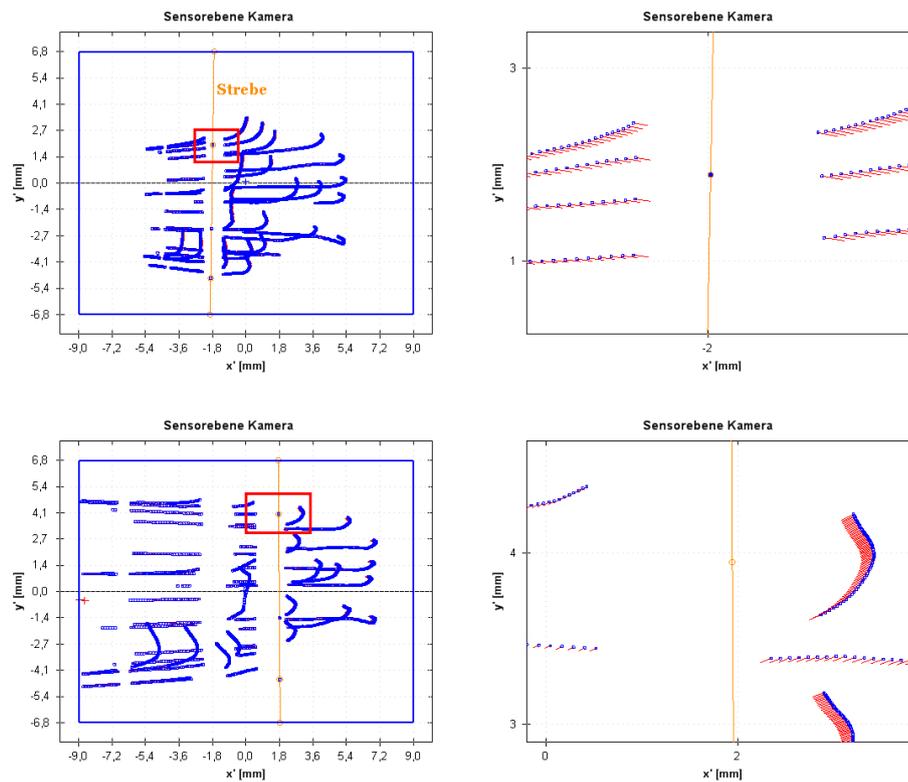


Bild 4-30 **Fallunterscheidung auf der Bildebene**
 KorAS Darstellung zweier aufzeichneter Bildsequenzen und der jeweiligen Geraden in der Bildebene für die Fallunterscheidung.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Überlegungen sind in die Optimierungssoftware integriert worden, so dass die Korrektur der jeweiligen Bildkoordinaten direkt mit dem richtigen Parametersatz durchgeführt wird. Somit besteht neben der Korrektur von nur einer Acrylglasplatte im Strahlengang auch die Möglichkeit, ohne Mehraufwand bei der Auswertung, die Korrektur unter Berücksichtigung der beiden Acrylglasplatten durchzuführen.

4.6 Fehlerhaushalt

Neben den in Kapitel 3.3 beschriebenen möglichen Modellabweichungen, die eine Verschlechterung der Ergebnisse von Mehrmedienaufnahmen zur Folge haben, werden in diesem Kapitel weitere Fehlerquellen analysiert, die speziell durch den vorhandenen Versuchsaufbau hervorgerufen werden.

4.6.1 Stabilität der Passpunkte und Kamerapositionen

Da bei einem Crashversuch durch den Aufprall des Fahrzeugs auf das Crashelement enorme Kräfte freigesetzt werden, ist eine Untersuchung der Stabilität der konstruierten Passpunkte [Kapitel 4.2.2] und der festgelegten Kamerapositionen [Kapitel 4.2.4] erforderlich. Für diese Analyse des dynamischen Verhaltens von Passpunkten und Kameras sind in mehreren Crashversuchen die Bildkoordinaten der installierten Passpunkte über die aufgezeichnete Bildsequenz des Versuchsfilmes gemessen worden. Über die Bildung der Mittelwerte

$$\bar{x}' = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x'_i \quad ; \quad \bar{y}' = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y'_i \quad \text{mit: } n = \text{Zeitschritte der Bildsequenz} \quad (4-34)$$

aus den Beobachtungen der gesamten Bildsequenz können die Abweichungen zum Mittelwert

$$v_{x_i} = \bar{x}' - x'_i \quad ; \quad v_{y_i} = \bar{y}' - y'_i \quad (4-35)$$

der einzelnen Koordinaten in den Koordinatenrichtungen x' und y' bestimmt werden. Aus der grafischen Darstellung dieser Abweichungen [Bild 4-31 und Bild 4-33] lassen sich Rückschlüsse auf die Stabilität der Passpunkte und der Kamerapositionen ziehen.

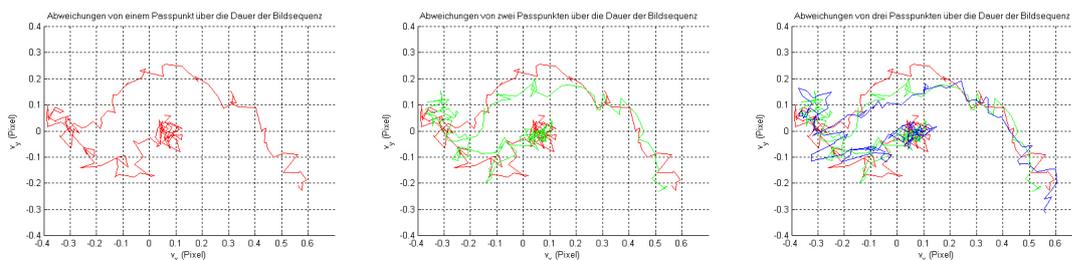


Bild 4-31 **Abweichungen der Bildkoordinaten der Passpunkte (0° Crash)**
Darstellung der Abweichungen der Bildkoordinaten der Passpunkte über die beobachtete Bildsequenz von 150 ms bei einem 0° Crash. Links: Ein Passpunkt, Mitte: Zwei Passpunkte; Rechts: Drei Passpunkte.

In Bild 4-31 sind die Abweichungen für die Bildkoordinaten der Passpunkte bei einem 0° Crash visualisiert. Die Interpretation des linken Bildes, in dem lediglich die Abweichungen für einen Passpunkt aufgetragen sind, ermöglicht nur die Aussage, dass während dem Crashversuch eine Bewegung stattfindet. Ob es sich hierbei um eine Bewegung der Passpunkte oder der Kamera handelt, kann durch die Analyse zusätzlicher Passpunkte geklärt werden. In der mittleren und der rechten Darstellung sind jeweils Abweichungen für weitere Passpunkte aufgeführt, so dass eine begründete Aussage über die Art der Bewegung getroffen werden kann. Da sich eine deutliche Systematik im Verlauf der Abweichungen für die unterschiedlichen Passpunkte erkennen lässt, kann auf eine instabile Kameraposition geschlossen werden. Die Variationen zwischen den Abweichungen der einzelnen Passpunkte liegen ungefähr im Bereich von 1/10 Pixel und repräsentieren die unter Verwendung der implementierten Bildverarbeitungsalgorithmen erreichbare Messgenauigkeit der Bildkoordinaten [Kapitel 5.1.2]. Die Passpunkte können somit als stabil angesehen werden.

Die Kamera gerät jedoch nach der Ruhelage zu Beginn des Crashversuches in Bewegung, welche wie folgt erklärt werden kann: Wird die Energie vom Aufprall des Fahrzeugs über das Mauerwerk auf die Befestigungsschiene [Bild 4-32] der Kameras übertragen, kommt es zu einer leichten Bewegung der Kamera in positiver X – Richtung im Fotograbenkoordinatensystem. Durch diesen Impuls ist die Kamera im weiteren Versuchablauf in Bewegung um die Nulllage.

Bei Analyse der gesamten aufgezeichneten Bildsequenz von 400 ms ist, durch die stark gedämpfte Schwingung, ein Einpendeln der Kamera auf die Anfangsposition zu erkennen.



Bild 4-32 Kamera auf Befestigungsschiene
Abbildung der Kamera U1 auf der Befestigungsschiene. Zusätzlich ist die Ausrichtung des Fotograbenkoordinatensystems dargestellt.

Des Weiteren lässt sich aus Bild 4-31 eine Aussage bezüglich der Art der Bewegung treffen. Durch den Verlauf der Kurven kann auf eine hauptsächlich translatorische Auswirkung der rotatorischen Bewegung der Kamera um den Befestigungspunkt der Schiene an der Wand geschlossen werden. Der rotatorische Anteil der Auswirkung dieser Bewegung liegt auf der Bildebene in der Größenordnung von 2/10 Pixeln und kann für die hier geforderten Genauigkeitsansprüche vernachlässigt werden.

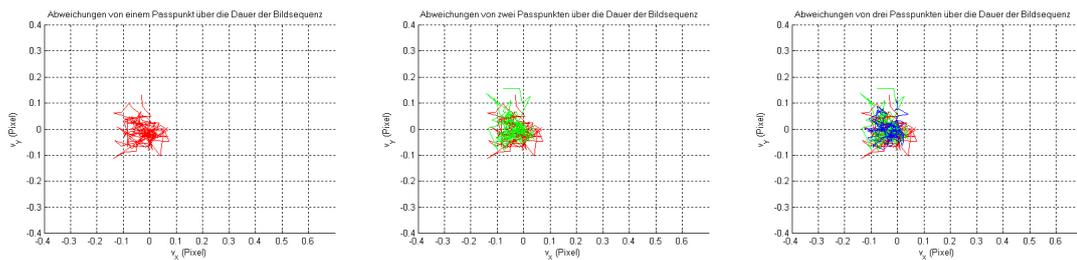


Bild 4-33 Abweichungen der Bildkoordinaten der Passpunkte (ODB Crash)
Darstellung der Abweichungen der Bildkoordinaten der Passpunkte über die beobachtete Bildsequenz bei einem Crash mit Deformationselement. Links: Ein Passpunkt, Mitte: Zwei Passpunkte; Rechts: Drei Passpunkte.

Die in Bild 4-33 dargestellten Abweichungen der Passpunkt bildkoordinaten bei einem Crash mit Deformationsbarriere (ODB Crash) zeigen deutlich, dass bei dieser Versuchsart keine Bewegung der Kameras auftritt. Die Energie des Fahrzeugaufpralls wird nicht auf die Befestigungsschiene der Kameras übertragen.

Als Ergebnis der Untersuchung bezüglich der Stabilität der Passpunkte und Kamerapositionen bleibt festzuhalten, dass die Passpunkte bei den unterschiedlichen Crasharten stabil bleiben, ebenso wie die Kamerapositionen bei einem Crashversuch mit Deformationsbarriere. Bei einem 0° Crash werden die Variationen zwischen den Abweichungen der Bildkoordinaten eines einzelnen Passpunktes bis zu einem Pixel groß. Für eine grobe Abschätzung der Auswirkungen dieser Fehler bei der dreidimensionalen Punktbestimmung ist eine erneute Aufnahmeplanung mit einer Bildkoordinatenmessgenauigkeit von einem Pixel durchgeführt worden. Die Ergebnisse für diese Berechnungen sind in Bild 4-34 zusammengefasst dargestellt.

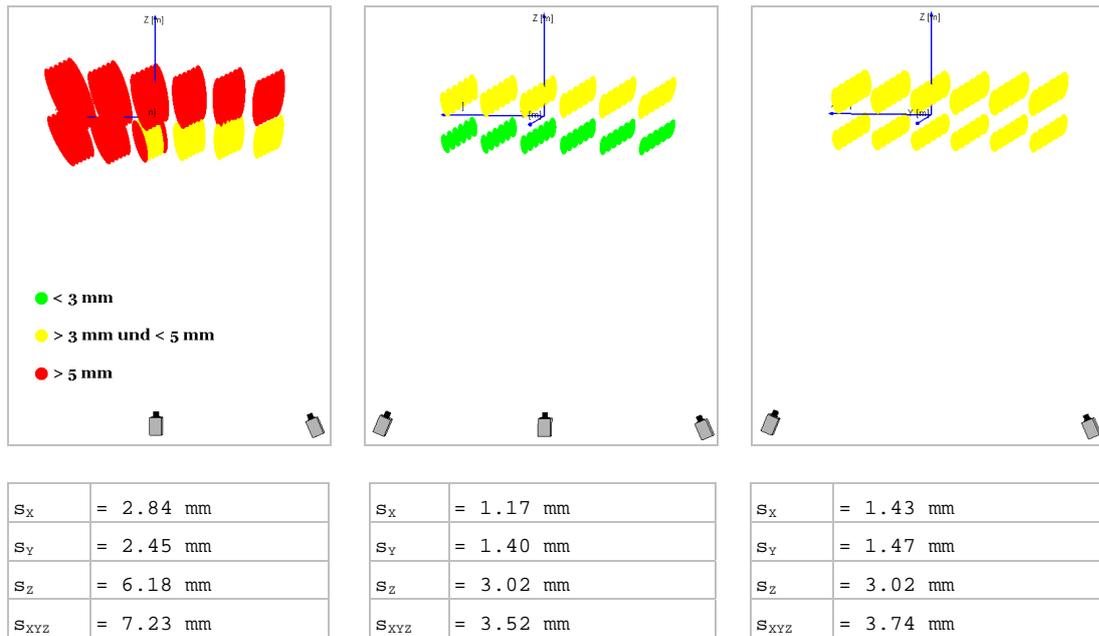


Bild 4-34 **Aufnahmeplanung mit nicht dynamischen Kamerapositionen**
 Visualisierung der Ergebnisse der Aufnahmeplanung durch Konfidenzellipse mit einem Signifikanzniveau von 95 %.

Die grafische Darstellung der Objektpunktgenauigkeiten [Bild 4-34] lässt schnell erkennen, dass die fehlende Berücksichtigung der Kamerabewegungen in manchen Bereichen und bei bestimmten Kamerakonstellationen zu unbrauchbaren Ergebnissen mit mittleren Punktfehlern größer als 5 mm führt. Die tabellarisch aufgeführten Standardabweichungen für den jeweiligen Objektpunkt, um den das Messvolumen aufgespannt wird, unterstützen diese Aussage. So wird, für die Erreichbarkeit der geforderten Messgenauigkeit von 5 mm, eine dynamische Kamerapositionierung bei einem 0° Crash erforderlich. Hierzu wird für jeden Zeitschritt der Bildsequenz mit den jeweils beobachteten Bildkoordinaten der Passpunkte ein räumlicher Rückwärtsschnitt gerechnet. So stehen für jede Millisekunde neue Werte für die Parameter der äußeren Orientierung zur Verfügung, die bei der Triangulation für den jeweils passenden Zeitschritt genutzt werden können. Da es sich hauptsächlich um eine translatorische Auswirkung der Bewegung der Kamera handelt, kann der berechnete neue Bezugspunkt für die radiale Verschiebung [Kapitel 4.3.4] als konstant angesehen werden. Lediglich eine rotatorische Bewegung hat, durch die daraus resultierende veränderte Orientierung der optischen Achse im Raum, Auswirkungen auf dessen Bestimmung.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse sollte darauf geachtet werden, dass es sich bei der Kamerabewegung um einen systematischen Fehlereinfluss auf die Bildkoordinaten handelt, der nichts mit der Bildkoordinatenmessgenauigkeit als zufälligem Fehler gemeinsam hat. Da dieser Fehler jedoch nicht auf alle drei Kameras in der Fotogrube gleich wirkt, kann die Abweichung von einem Pixel, für eine grobe Abschätzung der 3D Genauigkeit, als Bildkoordinatenmessgenauigkeit angenommen werden.

Zusätzlich sollte erwähnt werden, dass die Kamera U2 separat auf einem Stativ in der Fotogrube aufgebaut und nicht über eine Schienenführung mit dem Mauerwerk der Fotogrube verbunden ist. So ist sie unbeeinflusst von den in diesem Kapitel analysierten Effekten, die über das Mauerwerk und die Schienenführung lediglich auf die Kameras U1 und U3 übertragen werden.

4.6.2 Durchbiegung der Fotogrubenabdeckung

Wie die Untersuchungen bezüglich der Stabilität der Passpunkte und Kamerapositionen in Kapitel 4.6.1 ist die Analyse des dynamischen Verhaltens der Fotogrubenabdeckung während eines Crashversuches durch die beim Aufprall des Fahrzeugs freigesetzten Kräfte zu begründen. Da die Acrylglasplatten in stabilen Fundamenten gelagert und fixiert sind, ist eine Verschiebung der Platten durch die frei werdenden Kräfte nicht zu erwarten und zudem nicht relevant für die Anwendung des Korrekturverfahrens. Vielmehr ist eine Durchbiegung der Fotogrubenabdeckung durch den über die Reifen übertragenen Druck auf die jeweilige Platte vorstellbar.

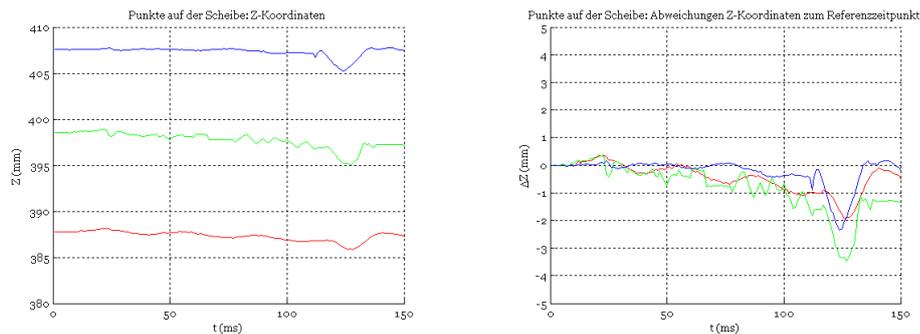


Bild 4-35 **Durchbiegung der Fotogrubenabdeckung**
 Links: Darstellung der Z – Koordinaten der Punkte auf der Fotogrubenabdeckung während eines Crashversuches; Rechts: Darstellung der Differenzen der Z – Koordinaten vom jeweiligen Zeitschritt zum Referenzzeitpunkt t_0 .

Für die Analyse dieser Vermutung sind mittig unter der vorderen Acrylglasplatte geklebte Messmarken während eines Crashversuches beobachtet worden. Für jeden Zeitschritt der Bildsequenz steht so eine dreidimensionale Koordinate für die Punkte zur Verfügung. Da das Koordinatensystem parallel zur Fotogrubenabdeckung gelagert ist, kann über die Z – Komponenten eine Aussage bezüglich der Durchbiegung der Acrylglasplatte getroffen werden.

In Bild 4-35 links sind die Z – Koordinaten von drei Punkten auf der Acrylglasplatte über der Zeit dargestellt. Bild 4-35 rechts zeigt die Differenzen der jeweiligen Z – Koordinate zum Referenzzeitpunkt t_0 , bei dem die Acrylglasplatte unbeeinflusst von den Kräften des Fahrzeugaufpralls ist. Die Darstellung zeigt eine Durchbiegung der Platte bei 125 ms nach Crashbeginn bis maximal 3,5 mm über einen Zeitbereich von 10 ms. Im Mittel liegen die Abweichungen zwischen 0,4 mm (blaue und rote Kurve) und 0,8 mm (grüne Kurve). Um die maximalen Auswirkungen dieser Durchbiegung auf die Korrektur der Bildkoordinaten abschätzen zu können, ist zunächst der Einfluss der Durchbiegung auf die Auftreffwinkel der Abbildungsstrahlen über

$$\alpha_{Diff} = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Z_{max}}{s} \right) \quad (4-36)$$

berechnet worden, wobei s die Strecke vom beobachteten Punkt zum Ende der Acrylglasplatte beschreibt. Der Winkel α_{Diff} repräsentiert den Winkel zwischen der horizontalen und der maximal durchgebogenen Acrylglasplatte und kann so ungefähr als maximaler Fehlereinfluss auf die Auftreffwinkel behandelt werden. Mit den in Kapitel 3.2 vorgestellten Zusammenhängen für die radiale Korrektur beim Sonderfall kann der Einfluss der Acrylglasplattendurchbiegung auf den berechneten radialen Korrekturterm für jeden Abbildungsstrahl bestimmt werden. Hierfür sind

für den Versuchsaufbau in der Fotogrube Auftreffwinkel zwischen 5° und 45° untersucht worden.

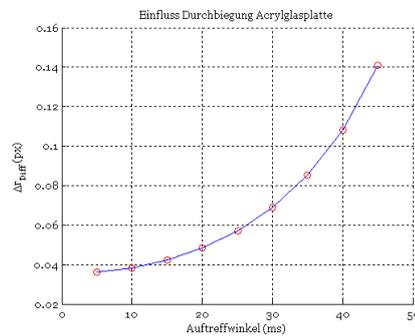


Bild 4-36 Einfluss der Durchbiegung der Acrylglasplatte auf Korrekturterm
Darstellung der Differenzen zwischen den radialen Korrekturtermen für die horizontale und die durchgebogene Acrylglasplatte für unterschiedliche Auftreffwinkel.

In Bild 4-36 sind die Differenzen zwischen den nach Formel (3-9) berechneten radialen Korrekturtermen für die horizontale und die durchgebogene Acrylglasplatte für unterschiedliche Auftreffwinkel graphisch dargestellt. Die Berechnungen für die durchgebogene Acrylglasplatte sind mit um α_{Diff} verfälschten Auftreffwinkeln durchgeführt worden. Bei größer werdenden Auftreffwinkeln ist ein quadratisches Wachstum der Fehlereinflüsse auf die radialen Korrekturterme festzustellen.

Da sich die Auftreffwinkel bei der Beobachtung der Fahrzeugunterseite aus der Fotogrube in der Regel zwischen 5° und 40° bewegen und die Durchbiegung in diesem Bereich eine maximale Auswirkung von 0,11 Pixel auf die radialen Korrekturterme hat, ist eine Berücksichtigung der Acrylglasplattendurchbiegung bei der Korrektur der Bildkoordinaten nicht erforderlich, um die geforderten Genauigkeiten einhalten zu können.

4.6.3 Einfluss der Schutzfolie

Zum Schutz der Acrylglasplatte wird bei den durchgeführten Crashversuchen eine 5 mm dicke ebenfalls aus Acrylglas bestehende Schutzfolie auf der Fotogrubenabdeckung fixiert. Sie verhindert ein Zerkratzen oder Splintern der dicken Acrylglasplatte durch den Fahrzeugaufprall. Bei der Fertigung von solch dünnen Scheiben kann es zu Unebenheiten an den Oberflächen kommen, so dass die Schutzfolie als nicht planparallel angesehen werden kann. Um die Größenordnung dieser Abweichungen von der angenommen Modellvorstellung der planparallelen Brechungsebene angeben zu können, ist der Einfluss der Schutzfolie auf die Bildkoordinatenmessung einer Referenzfläche analysiert worden. Hierfür wurde die SAE – Kalibriertafel [SAE, 1995] über der Fotogrube ungefähr in Höhe des im Versuch beobachteten Fahrzeugs fixiert [Bild 4-37 links].

Mit der senkrecht zur Acrylglasplatte ausgerichteten Kamera U1 ist ein Bild des Referenzfeldes mit und Eines ohne Schutzfolie aufgenommen worden. Über den Vergleich der jeweils gemessenen Bildkoordinaten kann eine Aussage über den Einfluss der Schutzfolie auf diese Beobachtungen getroffen werden. Zwischen den Bildkoordinaten aus den beiden Aufnahmen sind die Differenzen gebildet worden und in Bild 4-37 rechts als hundertfach überhöhte

Residuen graphisch dargestellt. Demnach sind auf der gesamten Abbildung keine vorhandenen Systematiken für den Einfluss der Schutzfolie auf die Bildkoordinatenmessung zu erkennen.

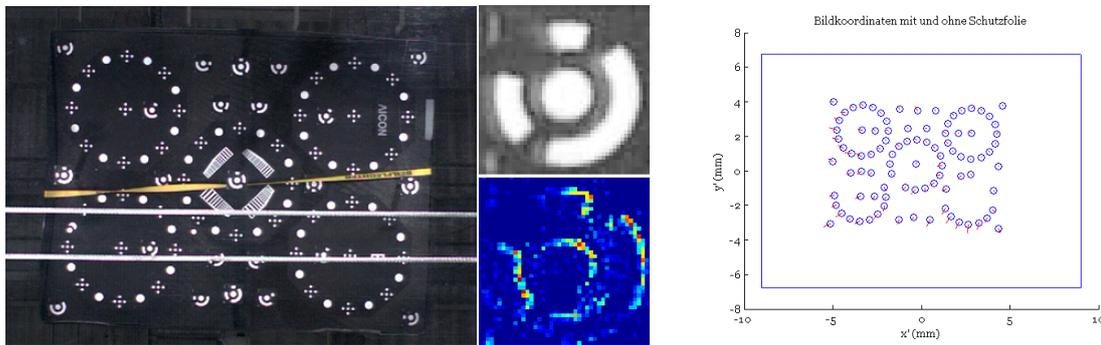


Bild 4-37 Einfluss Schutzfolie auf Bildkoordinatenmessung
 Links: Aufnahme mit Schutzfolie, Detaildarstellung einer CODE – Marke mit Differenzbild; Rechts: Darstellung der Differenzen in der Bildkoordinatenmessung über 100fach überhöhte Residuen.

Lediglich in einzelnen Bereichen, wie zum Beispiel bei dem linken unteren Kreis der Kalibrier-
 tafel, weisen die Residuen identische Orientierungen auf. Diese lokal systematischen Ab-
 weichungen sind auf einzelne kleine Wölbungen der Schutzfolie zurückzuführen, durch die die
 Abbildungsstrahlen lokal einheitlich beeinflusst werden. So ändern sich neben den unterschied-
 lichen Brechungseinflüssen durch unterschiedliche Ausrichtungen der Schutzfolie auch die
 Beleuchtungseigenschaften für bestimmte Bereiche in diesem Versuchsaufbau. Das Licht der
 Scheinwerfer an der Hallendecke wird durch die Wölbungen der Schutzfolie in einigen Berei-
 chen stark reflektiert. Hierdurch führt die Schutzfolie in den diesen Bereichen zu Stauchungen
 der abgebildeten Messmarken. Das in Bild 4-37 dargestellte Differenzbild zwischen der
 Abbildung einer CODE – Marke mit und ohne Schutzfolie veranschaulicht diese Stauchung. Die
 größten Veränderungen zwischen den Abbildungen treten in nur einer Richtung auf. Die
 Messmarke wird so nur an den rechten und oberen Grauwertkanten unterschiedlich abgebildet.
 Diese Stauchung führt zu geringeren Unterschieden zwischen den bestimmten Zentren der
 Messmarken, als eine einheitliche Verschiebung sämtlicher Grauwertkanten in eine Richtung.
 Für alle beobachteten Messmarken lässt sich ein durchschnittlicher Fehler [NIEMEIER,
 2002 - S. 6] von

$$\bar{v}_{x'} = 0,12 \text{ Pixel}$$

$$\bar{v}_{y'} = 0,11 \text{ Pixel}$$

berechnen. Im Durchschnitt bewegen sich die Fehlereinflüsse der Schutzfolie im Bereich der
 Messgenauigkeit. In einzelnen Bereichen liegen die Differenzen jedoch bei bis zu 0,3 Pixeln.
 Durch den Versuchsaufbau beim Crashversuch kann in diesen Bereichen gegebenenfalls mit
 einer Verringerung des Fehlereinflusses gerechnet werden. Zum einen kommt es durch die Ab-
 schattung des Fahrzeugs zu keinen Reflektionen der Beleuchtung an der Schutzfolie durch die
 Hallendeckenscheinwerfer und zum anderen können durch die Last des Fahrzeugs die Wölbun-
 gen in der Schutzschicht verringert werden.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen bleibt festzuhalten, dass der Einfluss der Schutzfolie nicht
 von systematischer Natur über die gesamte Ausdehnung der Schutzfolienfläche ist. In einzelnen
 lokalen Bereichen sind Differenzen zwischen den beiden Bildkoordinatenmessungen in einer
 Größenordnung von bis zu 0,3 Pixeln zu erkennen. Im Durchschnitt liegt der Fehlereinfluss
 jedoch bei ungefähr 0,1 Pixel und befindet sich somit im Bereich der Messgenauigkeit. Eine

Modellierung der Oberflächengeometrie der Schutzfolie ist somit für die geforderten Genauigkeitsbereiche nicht erforderlich. Zudem stellt eine realitätsgetreue Modellierung der Schutzfolie eine sehr komplexe Aufgabe dar, die durch die Bewegung des Fahrzeugs, die sich dadurch ändernde Form der Schutzfolie sowie der sich ändernden Beleuchtungseinflüsse dynamisch durchgeführt werden müsste. Als Vereinfachung wird die Dicke der Acrylglasplatte um die Ausdehnung der als planparallel angenommenen Schutzfolie erweitert.

4.6.4 Neuer Bezugspunkt

Die Genauigkeit des neu bestimmten Bezugspunktes für die radiale Verschiebung auf die Bildkoordinaten lässt sich über eine Varianz-Fortpflanzung abschätzen. Hierzu werden die in Kapitel 4.3.4 vorgestellten Beziehungen zu einem funktionalen Zusammenhang zwischen den unbekanntem Zufallsgrößen $\overline{DP}_x, \overline{DP}_y, \overline{DP}_z$ und den im Vorfeld bestimmten Zufallsgrößen $\bar{n}_x, \bar{n}_y, \bar{n}_z, \omega, \varphi$ zusammengefasst:

$$\begin{aligned}\overline{DP}_x &= \frac{\bar{n}_x \cdot c}{-\sin \varphi \cdot \bar{n}_x + \sin \omega \cdot \cos \varphi \cdot \bar{n}_y + \cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \bar{n}_z} \\ \overline{DP}_y &= \frac{\bar{n}_y \cdot c}{-\sin \varphi \cdot \bar{n}_x + \sin \omega \cdot \cos \varphi \cdot \bar{n}_y + \cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \bar{n}_z} \\ \overline{DP}_z &= \frac{\bar{n}_z \cdot c}{-\sin \varphi \cdot \bar{n}_x + \sin \omega \cdot \cos \varphi \cdot \bar{n}_y + \cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \bar{n}_z}\end{aligned}\tag{4-37}$$

Die Genauigkeiten von $\bar{n}_x, \bar{n}_y, \bar{n}_z$ sind aus der Ebenenausgleichung für die Orientierung der Acrylglasplatte im Strahlengang bekannt. Für die Elemente ω und φ der äußeren Orientierung der Kameras stehen die Ergebnisse des räumlichen Rückwärtsschnitts zur Verfügung. Für die Linearisierung des nichtlinearen funktionalen Zusammenhangs werden die partiellen Ableitungen nach den Beobachtungen $\bar{n}_x, \bar{n}_y, \bar{n}_z, \omega$ und φ an den Näherungsstellen L^0 gebildet:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \overline{DP}_x}{\partial \bar{n}_x} &= \frac{c \cdot t + (\bar{n}_x \cdot c) \cdot \sin \varphi}{t^2} & \frac{\partial \overline{DP}_x}{\partial \bar{n}_y} &= \frac{-(\bar{n}_x \cdot c) \cdot \sin \omega \cdot \cos \varphi}{t^2} \\ \frac{\partial \overline{DP}_y}{\partial \bar{n}_x} &= \frac{(\bar{n}_y \cdot c) \cdot \sin \varphi}{t^2} & \frac{\partial \overline{DP}_y}{\partial \bar{n}_y} &= \frac{c \cdot t - (\bar{n}_y \cdot c) \cdot \sin \omega \cdot \cos \varphi}{t^2} \\ \frac{\partial \overline{DP}_z}{\partial \bar{n}_x} &= \frac{(\bar{n}_z \cdot c) \cdot \sin \varphi}{t^2} & \frac{\partial \overline{DP}_z}{\partial \bar{n}_y} &= \frac{-(\bar{n}_z \cdot c) \cdot \sin \omega \cdot \cos \varphi}{t^2}\end{aligned}\tag{4-38}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \overline{DP}_x}{\partial \bar{n}_z} &= \frac{-(\bar{n}_x \cdot c) \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi}{t^2} \\ \frac{\partial \overline{DP}_y}{\partial \bar{n}_z} &= \frac{-(\bar{n}_y \cdot c) \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi}{t^2} \\ \frac{\partial \overline{DP}_z}{\partial \bar{n}_z} &= \frac{c \cdot t - (\bar{n}_z \cdot c) \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi}{t^2}\end{aligned}$$

$$\frac{\partial \overline{DP}_x}{\partial \omega} = \frac{-(\vec{n}_x \cdot \vec{c}) \cdot (\cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \vec{n}_y - \sin \omega \cdot \cos \varphi \cdot \vec{n}_z)}{t^2}$$

$$\frac{\partial \overline{DP}_x}{\partial \varphi} = \frac{-(\vec{n}_x \cdot \vec{c}) \cdot (-\cos \varphi \cdot \vec{n}_x - \sin \varphi \cdot \sin \omega \cdot \vec{n}_y - \cos \varphi \cdot \sin \omega \cdot \vec{n}_z)}{t^2}$$

mit

$$t = -\sin \varphi \cdot \vec{n}_x + \sin \omega \cdot \cos \varphi \cdot \vec{n}_y + \cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \vec{n}_z.$$

Die Ableitungen von \overline{DP}_y und \overline{DP}_z nach ω und φ ergeben sich durch Ersetzen von $(\vec{n}_x \cdot \vec{c})$ mit $(\vec{n}_y \cdot \vec{c})$ bzw. $(\vec{n}_z \cdot \vec{c})$. Die partiellen Ableitungen können in der A-Matrix zusammengefasst und in das allgemeine Varianz-Fortpflanzungs-Gesetz

$$\Sigma_{ff} = A \cdot \Sigma_{LL} \cdot A^T \quad (4-39)$$

eingesetzt werden. Über diesen Zusammenhang lässt sich die Genauigkeit des zu bestimmenden Durchstoßpunktes abschätzen.

Die für den neuen Bezugspunkt auf der parallel zur Bildebene aufgespannten Ebene relevanten Zufallsgrößen konnten beispielhaft für eine Kameraposition mit einer Genauigkeit von

$$s_{\overline{DP}_x} = 0,11 \text{ Pixel}$$

$$s_{\overline{DP}_y} = 0,14 \text{ Pixel} \quad (4-40)$$

berechnet werden. Die Standardabweichungen für den Bezugspunkt liegen so im Bereich der Messgenauigkeit der beobachteten Bildkoordinaten. Die radiale Korrektur der Bildkoordinaten kann also ohne erkennbaren Genauigkeitsverlust auf den berechneten Durchstoßpunkt bezogen werden.

4.6.5 Parameter der Acrylglasplatte

Neben den Fehlereinflüssen, die aus dem vorhandenen Versuchsaufbau, dem entwickelten Verfahren und den Folgen des Fahrzeugcrashs analysiert werden müssen, ist eine Aussage über die benötigten Genauigkeiten der Parameter für die optischen und geometrischen Eigenschaften der Acrylglasplatte von großer Bedeutung. Zu den relevanten Größen der Acrylglasplatte zählen die Dicke d und die Brechzahl n . Eine Aussage über den Einfluss dieser Parameter auf die Bestimmung des radialen Abstands Δr (3-9) kann über deren Variation bei der Berechnung von Δr getroffen werden. Hierzu sind, wie in Kapitel 4.6.1 beschrieben, die Differenzen zwischen den radialen Korrekturtermen für einen Wert resultierend aus Referenzwerten für die Brechzahl und die Plattendicke und einem Wert mit jeweils einer verfälschten Brechzahl oder einer verfälschten Plattendicke gebildet worden. Die daraus resultierenden Differenzen für Auftreffwinkel zwischen 5° und 40° sind in Bild 4-38 graphisch dargestellt. Für die Analyse des Fehlereinflusses der Brechzahl, ist deren Wert zwischen 1,4910 und 1,4932 um jeweils 0,0002 erhöht worden [Bild 4-38 links]. Weiterhin wurde die Dicke der Acrylglasplatte von 85 mm auf 85,8 mm um jeweils 0,05 mm vergrößert [Bild 4-38 rechts]. Die Abbildungen zeigen bei maximalen Variationen von 0,0022 bei der Brechzahl oder 0,8 mm bei der Plattendicke Differenzen zwischen den berechneten radialen Abständen von 0,04 bis 0,18 Pixeln auf. Bei der Variation der Brechzahl ist für die Differenzen bei größer werdenden Auftreffwinkeln ein näherungsweise

lineares Wachstum zu erkennen. Die Änderung der Plattendicke führt hingegen zu einem tendenziell quadratischen Wachstum der Differenzen.

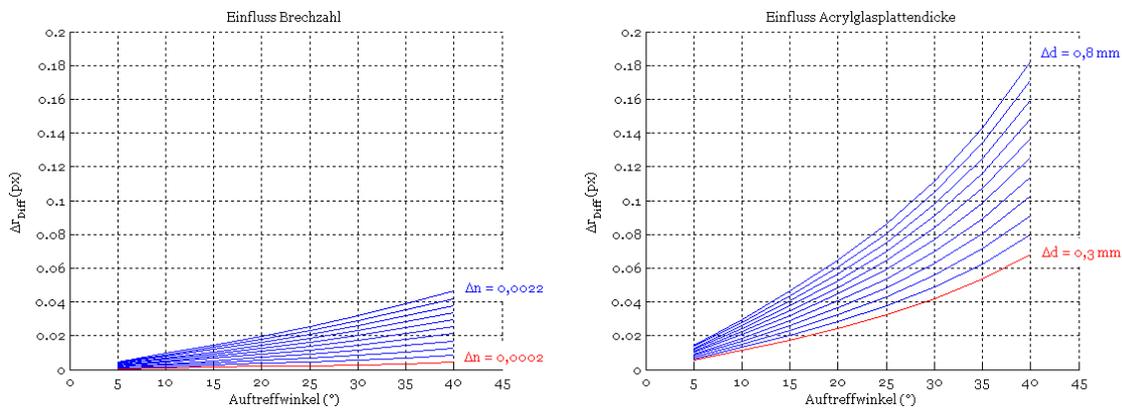


Bild 4-38 Einfluss der Parameter der Acrylglasplatte
 Links: Darstellung der Differenzen von Δr bei der Variation der Brechzahl; Rechts: Darstellung der Differenzen von Δr bei der Variation der Acrylglasplattendicke.

Für die in der Regel bei der Beobachtung der Fahrzeugunterseite aus der Fotogrube zwischen 5° und 40° vorhandenen Auftreffwinkel bewegen sich die maximalen Differenzen für die betrachteten Variationen der Acrylglasplattenparameter im Bereich der Messgenauigkeit der Bildkoordinaten. Zusätzlich sind die angenommenen maximalen Variationen von $0,0022$ bei der Brechzahl und $0,8 \text{ mm}$ bei der Plattendicke durch vorhandene Mess- und Fertigungsverfahren deutlich zu unterbieten. So ermöglicht die Prüfvorschrift ISO 489 eine Bestimmung der Brechzahl im Genauigkeitsbereich von $\pm 0,0002$ [KECK, 2006]. Eine Acrylglasplatte in der Größenordnung der Fotogrubenabdeckung kann mit einer maximalen Dickschwankung von $0,3 \text{ mm}$ auf der gesamten Fläche gefertigt werden [BIRKHOLZ, 2006]. Die Kurven für die Variationen in dieser Größenordnung zeigen Differenzen bei Auftreffwinkeln von 40° deutlich unterhalb der Messgenauigkeit. So führt eine Variation der Brechzahl um $0,0002$ zu einer $0,004$ Pixel großen Änderung des radialen Fehlers Δr . Aus einer Abweichung der Acrylglasplattendicke von $0,3 \text{ mm}$ resultiert eine Differenz von $0,07$ Pixeln bei der Berechnung von Δr .

Die Untersuchungen in diesem Kapitel zeigen, dass bei den hochgenauen Fertigungs- und Messverfahren für die Brechzahl und die Plattendicke der Acrylglasplatte keine relevanten Fehlereinflüsse durch eventuelle Ungenauigkeiten der Parameter auf die Bestimmung der radialen Verschiebung zu erwarten sind.

4.6.6 Zusammenfassung

Zusätzlich zu den in Kapitel 3.3 beschriebenen Einflüssen von Medien im Strahlengang auf die Bildqualität und möglichen Abweichungen von der angenommenen Modellvorstellung für die reale Abbildungsgeometrie sind in diesem Kapitel weitere potentielle Fehlerquellen für die dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite diskutiert worden. Die Untersuchungen zur Stabilität der Passpunkte und Kamerapositionen und zum Einfluss der Durchbiegung der Acrylglasplatte beziehen sich auf die Folgen der dynamischen Vorgänge beim Crashversuch. Für einen 0° Crash konnte eine Kamerabewegung nachgewiesen werden, die über eine dynamische Kamerapositionierung berücksichtigt werden kann. Die Durchbiegung der Platte ist mit einem

Fehlereinfluss von maximal 0,11 Pixeln bei einem Auftreffwinkel der Abbildungsstrahlen auf die Acrylglasplatte von 40° vernachlässigbar klein. Für die Auswirkungen der vorhandenen Schutzfolie über der Acrylglasplatte sind keine modellierbaren Systematiken aufgedeckt worden. Mit einem durchschnittlichen Fehler von 0,12 Pixeln bewegen sich die Fehlereinflüsse im Bereich der geforderten Messgenauigkeit. So wird, für die Korrektur der Bildkoordinaten nach dem vorgestellten Verfahren, die Acrylglasplattendicke um die Dicke der Schutzfolie erweitert. Die erreichbaren Genauigkeiten bei der Durchstoßpunktberechnung und die Einflüsse eventueller Ungenauigkeiten der Acrylglasplattenparameter liegen ebenfalls im gewünschten Messgenauigkeitsbereich.

Die in diesem Kapitel aufgeführten Fehlereinflüsse führen einzeln betrachtet zu keinen erkennbaren Genauigkeitsverlusten der dreidimensionalen Punktbestimmung der Fahrzeugunterseite. In ihrer Gesamtheit können sie sich jedoch in Kombination mit den in Kapitel 3.3 beschriebenen Einflüssen negativ auf die erreichbaren Genauigkeiten bei der photogrammetrischen Bestimmung der Fahrzeugunterbodenpunkte auswirken. Die Untersuchung dieser möglicherweise negativen Auswirkungen ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit und aufgrund des großen Aufwandes gesondert zu prüfen.

4.7 Zusammenfassung

In Kapitel 4 ist die Entwicklung eines Verfahrens für die dynamische dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite im Crashversuch vorgestellt worden. So konnte nach der Herausstellung der genauen Problemstellen [Kapitel 4.1] der Aufbau eines Passpunktfeldes in der Fotogrube zur hochgenauen Kamerapositionierung von den theoretischen Vorüberlegungen bis hin zur praktischen Umsetzung umgesetzt werden [Kapitel 4.2]. Aufbauend auf dieser Grundlage ist in Kapitel 4.3 eine allgemeine Modellierung der Abbildungsgeometrie für Mehrmedienaufnahmen unabhängig von der gegenseitigen Ausrichtung der Bild- und der Brechungsebene hergeleitet worden. Über das programmierte Optimierungstool *KorAS* konnte das entwickelte Verfahren in die dynamische Filmauswertung integriert werden, so dass der operative Einsatz der dreidimensionalen Auswertung der Fahrzeugunterseite ermöglicht wird [Kapitel 4.4]. Anschließend ist in die Optimierungssoftware eine Erweiterung des Modells um eine zusätzliche, beliebig im Raum gelagerte Acrylglasplatte eingebunden worden. Hierzu wird auf der Bildebene geprüft, durch welche Acrylglasplatte die jeweiligen Abbildungsstrahlen der unterschiedlichen Kamerastandorte laufen [Kapitel 4.5]. Abschließend konnten die potentiellen Fehlerquellen bei der Filmauswertung von Aufnahmen aus der Fotogrube analysiert und bewertet werden [Kapitel 4.6].

So ermöglicht das in diesem Kapitel hergeleitete und umgesetzte Verfahren eine dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite, die sich optimal in die bestehenden Prozesse der Versuchsvorbereitung, der Versuchsdurchführung und der Versuchsauswertung integrieren lässt.

5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE

Um die Anwendbarkeit des in Kapitel 4 hergeleiteten Verfahrens und die damit verbundene Genauigkeitssteigerung der dreidimensionalen Punktbestimmung der Fahrzeugunterseite prüfen zu können, sind einige Crashversuche für eine Filmauswertung aus der Fotogrube ausgerüstet worden. Hierzu zählt zum einen die Positionierung von drei synchron aufnehmenden Kameras in der Fotogrube in den definierten Bereichen [Kapitel 4.2.4] und zum anderen die Signalisierung und Vermessung der relevanten Fahrzeugunterbodenpunkte im Fahrzeugkoordinatensystem während der Versuchsvorbereitung. Für den Prozess der Bildaufzeichnung sind anspruchsvolle Anforderungen an die eingesetzten Kameras und die installierte Beleuchtungsanlage zu erfüllen. Die Anwendung des entwickelten Korrekturverfahrens erfordert genaue Informationen über die optischen und geometrischen Eigenschaften der Acrylglasplatten, die als Fotogrubenabdeckung dienen. Des Weiteren sind auf den beiden Acrylglasplatten und auf der Strebe zwischen diesen beiden Platten Zielmarken positioniert worden. Nach diesen Vorbereitungen stehen mit den synchron aufgenommenen Versuchsfilmen aus der Fotogrube sämtliche Informationen für eine dreidimensionale Filmauswertung zur Verfügung. Im Folgenden werden vier unterschiedliche Auswertungen durchgeführt, die die Verbesserungen durch das neue Verfahren aufzeigen.

- Auswertung im Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 ohne Korrektur
- Auswertung im Fotogrubenkoordinatensystem ohne Korrektur
- Auswertung im Fotogrubenkoordinatensystem mit Korrektur einer Scheibe
- Auswertung im Fotogrubenkoordinatensystem mit Korrektur beider Scheiben

Anhand eines Beispielversuches können die Unterschiede zwischen diesen einzelnen Auswertungen veranschaulicht und diskutiert werden, so dass abschließend eine Aussage über die Anwendbarkeit des entwickelten Korrekturverfahrens getroffen werden kann.

5.1 Verwendete Hardwaresysteme

Um eine genaue Analyse der Strukturverformung des Fahrzeugs durchführen zu können, werden dreidimensionale Informationen der relevanten Messpunkte in einer sehr hohen Frequenz benötigt. Diese extrem hohen Aufnahmezeiten führen zu den anspruchsvollen Voraussetzungen bezüglich der Belichtungszeit und der Synchronität der Kameras.

5.1.1 Kameras

Für die Aufzeichnung der durchgeführten Crashversuche stehen Highspeed – Kameras vom Typ HG-100K [Bild 5-1 links] der Firma Redlake zur Verfügung. Bei einer maximalen Ortsauflösung von 1504 x 1128 Pixeln mit einer Pixelgröße von 12 μm kann eine Bildrate von 1000 Bildern pro

Sekunde erreicht werden. Der in der HG-100K integrierte Active-Pixel-CMOS Sensor kombiniert sowohl die Fotodiode als auch die Ausleselektronik für jedes Pixel. So wird bereits im Bildelement eine Umwandlung der in den Fotodioden gesammelten Ladungspakete in Spannungen und dadurch eine direkte Digitalisierung auf dem Chip realisierbar [GÖHRING, 2002]. Durch diese Sensorarchitektur sind CMOS – Sensoren nicht von störenden Bloomingeffekten betroffen, die bei CCD – Sensoren zu Überblendungen an besonders hellen und somit energiereichen Stellen führen können. Durch die Anordnung der Kameras und der vielen Beleuchtungsquellen in der Versuchshalle kann eine direkte Aufnahme in Richtung einer Beleuchtungsquelle kaum verhindert werden, so dass dieser Vorteil ein wesentlicher Grund für den bevorzugten Einsatz von CMOS – Sensoren ist.

Ein weiterer Vorteil besteht in der Möglichkeit der CMOS – Sensoren nur einzelne Teile des Bildes über die einzeln adressierten Bildelemente auszulesen, so dass der beobachtete Bildausschnitt schnell angepasst und die ausgelesene Datenmenge, bezogen auf die Vollauflösung, reduziert werden kann. Aus photogrammetrischer Sicht ist hierbei wichtig, wie die Auswahl des Bildausschnittes getroffen wird. Untersuchungen haben ergeben, dass der Bildausschnitt ausgehend vom Bildhauptpunkt festgelegt wird und die zentralperspektivische Abbildung somit erhalten bleibt.



Bild 5-1 Kamera, Objektiv und Kalibriertafel
 Links: Redlake HG-100K [REDLAKE, 2007], Mitte: Nikon Objektiv AF Nikkor 24 mm mit Querschnitt durch das Linsensystem [NIKON, 2007], Rechts: SAE Kalibriertafel.

Für die Aufnahmen der Crashversuche werden Weitwinkel- und Normalobjektive von der Firma Nikon mit Festbrennweiten zwischen 20 mm und 60 mm verwendet [Bild 5-1 Mitte]. In der Fotogrube kommen bisher ausschließlich 24 mm Festbrennweiten zum Einsatz.

Die Kalibrierung der Kameras wird mit Hilfe der SAE – Kalibriertafel [Bild 5-1 rechts], die nach SAE J211/2 [SAE, 1995] mit 80 Marken auf 5 Ringen und zusätzlichen CODE Marken und Hochpunkten ausgestattet ist, für jede Kamera im Vorfeld durchgeführt. Hierzu werden vier konvergente und vier gekantete Aufnahmen [GODDING, 1993] des Testfeldes benötigt, um die Parameter der inneren Orientierung nach dem BROWNSchen Ansatz [BROWN, 1971] im Zuge einer Bündelausgleichung [Kapitel 2.2.7] optimal bestimmen zu können. Für die aktuellen Genauigkeitsanforderungen und die eingesetzten Kamera- und Objektivtypen reicht eine Bestimmung der Bildhauptpunktlage und der radial-symmetrischen Verzeichnung aus, da die weiteren Parameter der inneren Orientierung in Bezug auf die geforderte Genauigkeit keine signifikanten Auswirkungen auf die Ergebnisse der dreidimensionalen Filmauswertung haben [RAGUSE ET AL., 2004]. Des Weiteren können die Parameter im Verlauf der aufgezeichneten Bildsequenz als konstant angenommen werden.

Für die Synchronisation der Kameras wird ein programmierbarer Frequenzgenerator verwendet, der den Kameras ein externes Synchronisationssignal aufzwingt. Die eingesetzte serielle Spannungsschnittstelle RS485 eignet sich optimal für Hochgeschwindigkeitsübertragungen über große Entfernungen und ermöglicht durch die so genannte „multipoint“ – Fähigkeit das Anschließen von bis zu 32 Kameras. Die Synchronisationsgenauigkeit bewegt sich im einstelligen μs – Bereich und ist im Wesentlichen von den internen Verarbeitungsschritten in den Kameras abhängig. Eine Übersicht über die verschiedenen Kamerasynchronisationsverfahren befindet sich in [RAGUSE, 2007].

5.1.2 Beleuchtung und Zielmarken

Durch die sehr kurzen Belichtungszeiten von nur $248 \mu\text{s}$ ist eine leistungsstarke Beleuchtungsanlage eine existentielle Grundlage für die Filmauswertung. Für die Ausleuchtung der Fotogrube sind Scheinwerfer vom Typ Arrisun 40/25 [Bild 5-2 links] der Firma ARRI installiert. Eine Sekunde vor Aufprall des Fahrzeugs auf das Crashelement wird die Standardleistung der einzelnen Scheinwerfer [ARRI, 2007] verdoppelt, so dass die Fahrzeugunterseite während des gesamten Crashes mit doppelter Leistung beleuchtet wird.

Sowohl Passpunkte, als auch Objektpunkte werden für die eindeutige und genaue Erfassung und die rechnergestützte Auswertung mit Zielmarken signalisiert.



Bild 5-2 **Scheinwerfer und Zielmarken**
 Links: Arrisun 40/25 Scheinwerfer [ARRI, 2007]; Rechts: Zielmarken: DOT, MXT, CODE.

Die in Bild 5-2 rechts dargestellten verschiedenen Zielmarkentypen erreichen bei ausreichendem Markendurchmesser ($\text{DOT} > 5 \text{ Pixel}$, $\text{MXT} > 9 \text{ Pixel}$, $\text{CODE} > 15 \text{ Pixel}$) eine zuverlässige und robuste Bestimmung der Position im Bild mit einer Genauigkeit von $1/10 \text{ Pixel}$ unter Laborbedingungen [KÖLLER & SCHRADER, 1996]. Um einen möglichst geringen Markendurchmesser für die Detektion der Markenmitte zu ermöglichen, sind für die Auswertung der Fahrzeugunterseite ausschließlich DOT Marken verwendet worden.

5.1.3 Eigenschaften der Fotogrubenabdeckungen

Neben den vorgestellten Kameras, der Beleuchtungsanlage und den unterschiedlichen Zielmarkentypen, die in diesem Rahmen auch für die dreidimensionale Filmauswertung von oben verwendet werden, sind für eine erfolgreiche Auswertung der Fahrzeugunterseite die Eigenschaften der Acrylglasplatten von großer Bedeutung. Hierbei werden speziell die hochgenaue Plattendicke und die Brechzahl der jeweiligen Acrylglasplatte benötigt.

Die als Fotogrubenabdeckung eingesetzten Acrylglasplatten sind ausschließlich nach dem Gießverfahren gefertigt worden, welches sich vor allem durch eine höhere Biegefestigkeit vom Extrusionsverfahren unterscheidet. Des Weiteren ist durch das Gießverfahren eine qualitativ

höherwertige Oberfläche und Planität der gegossenen Platte zu erreichen. Hinsichtlich der optischen Qualität bezüglich Homogenität und Isotropie entsprechen sich beide unterschiedlichen Fertigungsverfahren [DEGUSSA AG, 2004].

Optische Eigenschaften	Acrylglas gegossen	Prüfvorschrift
Transmissionsgrad	~ 92 %	DIN 5036, Teil 3
Reflexionsverlust im sichtbaren Bereich je Grenzfläche	4 %	-
Gesamtenergie-Durchlassgrad	85 %	DIN EN 410
Absorption im sichtbaren Bereich	< 0,05 %	-
Brechzahl n^{20}	1,491	ISO 489

Tabelle 5-1 Optische Eigenschaften Acrylglas
Auflistung der optischen Eigenschaften für das als Fotograbenabdeckung verwendete Acrylglas [DEGUSSA AG, 2004].

In Tabelle 5-1 sind die optischen Eigenschaften der verwendeten Acrylglasplatten aufgelistet. Von besonderer Bedeutung ist die Brechzahl, die nach der Prüfvorschrift ISO 489 über einen Abbé-Refraktometer, durch mikroskopische Beobachtung der Becke-Linie oder interferometrische Messungen [KECK, 2006] zu 1,491 bestimmt werden kann. So ist zum Beispiel eine Bestimmung der Brechzahl über den Abbé-Refraktometer mit einer Genauigkeit von $\pm 0,0002$ möglich [KECK, 2006]. Des Weiteren ist die Brechzahl bei einer Referenztemperatur von 20 °C bestimmt worden und entspricht somit ungefähr der in der Versuchshalle vorherrschenden Temperatur. Zudem führt eine Abweichung der Hallentemperatur zur Referenztemperatur nur zu geringen Beeinflussungen der Brechzahl [DEGUSSA AG, 2006]. Die Dispersion [Kapitel 3.3] des verwendeten Acrylglasses führt zu einer Variation der Brechzahl für den Bereich des sichtbaren Lichtes von einem Prozent [DEGUSSA AG, 2006]. Da kurzwelliges Licht stärker gebrochen wird als langwelliges Licht, kann diese Abhängigkeit der Brechzahl von der Wellenlänge zu Farbsäumen an den abgebildeten Objektpunkten führen. Für eine strenge Berücksichtigung dieses Effektes müsste sowohl die Kurve der spektralen Empfindlichkeit des Sensors, als auch die spektrale Emission der Lichtquelle bekannt sein und eine entsprechend korrigierte Brechzahl verwendet werden [MAAS, 1992]. Die Untersuchungen in dieser Arbeit sind mit einer als konstant angenommenen Brechzahl von 1,491 durchgeführt worden.

Neben der Brechzahl ist zusätzlich die Dicke der eingesetzten Acrylglasplatten relevant. Sie wird für die große Acrylglasplatte mit 80 mm und einer maximal zulässigen Dickschwankung über der gesamten Fläche von $\pm 0,3$ mm angegeben [BIRKHOLZ, 2006]. Für die kleinere, im hinteren Bereich der Fotogrube eingesetzte Acrylglasplatte ergibt sich bei gleicher zulässiger Dickschwankung die Dicke zu 50 mm.

So stehen alle für die Anwendung des entwickelten Korrekturverfahrens benötigten Informationen zur Verfügung. Im folgenden Kapitel werden nun die erzielten Ergebnisse für einen beispielhaften Versuch vorgestellt.

5.2 Erzielte Ergebnisse

Für die Validierung des in Kapitel 4 vorgestellten Verfahrens zur Berücksichtigung einer oder zwei beliebig im Raum gelagerter Acrylglasplatten auf die dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite konnten aufgezeichnete Bildsequenzen von mehreren durchgeführten Crashversuchen herangezogen werden. Die Auswirkungen des entwickelten Korrekturverfahrens auf die dreidimensionale Punktbestimmung werden durch die in den folgenden Kapiteln durchgeführten unterschiedlichen Auswertungen dargestellt und diskutiert.

In sämtlichen Darstellungen von den dreidimensionalen Ergebnistrajektorien der Messpunkte sind die Punkte abhängig von ihrem mittleren Punktfehler eingefärbt (< 3 mm grün, ≥ 3 mm und ≤ 5 mm gelb, > 5 mm rot) und proportional zu den jeweiligen Standardabweichungen der einzelnen Koordinaten in der jeweiligen Koordinatenrichtung skaliert.

Des Weiteren sind alle in diesem Kapitel vorgestellten Versuche lediglich mit den beiden seitlichen Kameras U2 und U3 ausgewertet worden. Hierfür können drei Gründe aufgeführt werden:

Der wohl wesentlichste Grund liegt in der signifikanten Verschlechterung der Genauigkeit bei Auswertungen mit den Kamerakonstellationen U1-U2 und U1-U3, unabhängig davon, ob die Punkte beeinflusst oder unbeeinflusst vom Brechungseinfluss der Acrylglasplatten sind. Da durch die Abschattungen der Strebe [Kapitel 5.2.5] keine konstante Auswertung mit der Kamerakonstellations U1-U2-U3 möglich ist, kommt es bei drei verwendeten Kameras zu Genauigkeitssprüngen in der Trajektorie, sobald eine seitliche Kamera keine Bildkoordinaten zur Triangulation beitragen kann und die dreidimensionale Punktbestimmung lediglich über U1-U2 oder U1-U3 erfolgt. Die Abweichungen zwischen triangulierten Punkten mit den Konstellationen U1-U2-U3 und U2-U3 liegen deutlich unterhalb der geforderten Genauigkeit von fünf Millimetern und rechtfertigen so eine Bewertung des vorgestellten Verfahrens auf Grundlage der erzielten Ergebnisse mit der Kamerakonstellations U2-U3. Die Ursache für die Verschlechterungen der Genauigkeiten für Auswertungen mit den Kameras U1-U2 und U1-U3 konnte abschließend nicht aufgedeckt werden und bleibt weiter zu analysieren.

Ein zweiter Grund ist die nicht bestimmbare äußere Orientierung der Kamera U1 bezogen auf das Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 für die Auswertung in Kapitel 5.2.1. Durch den von den Versuchsingenieuren festgelegten Kameraausschnitt der Kamera U1 sind für die ausgewerteten Crashversuche nicht genügend Fahrzeugpunkte zum Zeitpunkt t_0 zu beobachten, so dass sich für die Lösung des räumlichen Rückwärtsschnittes ein unterbestimmtes Ausgleichssystem ergibt. Somit können die Parameter der äußeren Orientierung nicht bestimmt werden. Aus diesem Grund kann die direkte Auswertung im Fahrzeugkoordinatensystem lediglich über die Kameras U2 und U3 durchgeführt werden. Für einen bewertenden Vergleich zwischen den unterschiedlichen Auswertungsergebnissen sollten für sämtliche Auswertungen gleiche Bedingungen, sprich gleiche Kamerakonstellationen gelten.

Der dritte und letzte Grund spricht für eine Verwendung der Kamerakonstellations U2-U3, um Äquivalenz zu den in Bild 4-13 visualisierten und in Kapitel 4.3.1 diskutierten Zusammenhängen zu erhalten, die sich auf ein Aufnahmesystem mit zwei Kameras beziehen.

5.2.1 Auswertung direkt im Fahrzeugsystem zum Zeitpunkt t_0

Erste Untersuchungen und Auswertungen sind bezogen auf das Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 durchgeführt worden. Hierbei konnten bei genügend sichtbaren Punkten auf der Fahrzeugunterseite die Kameras über diese Punkte und deren Koordinaten aus der Vorvermessung orientiert werden. Für eine solche Bestimmung der Orientierungsparameter liegen die Standardabweichungen im Bereich von bis zu 30 mm [Tabelle 4-1]. Bild 4-2 zeigt eine beispielhafte dreidimensionale Trajektorie für eine Auswertung mit den im Fahrzeugkoordinatensystem orientierten Kameras und ohne Berücksichtigung des Acrylglasplatteneinflusses auf die Bildkoordinatenmessung.

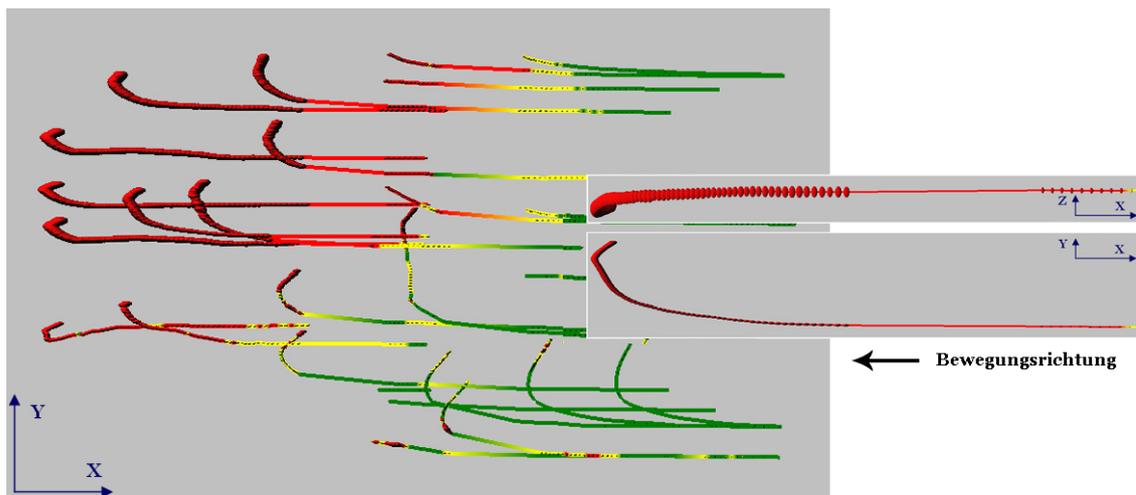


Bild 5-3 Trajektorien Fahrzeugsystem ohne Korrektur
Darstellung der dreidimensionalen Trajektorien für sämtliche Punkte auf der Fahrzeugunterseite nach einer Auswertung bezogen auf das Fahrzeugkoordinatensystem und ohne Korrektur der Acrylglasplatte.

In Bild 5-3 ist die Gesamtheit aller triangulierten Punkte auf der Fahrzeugunterseite für sämtliche Zeitschritte der aufgezeichneten Bildsequenzen als Gruppe von Trajektorien mit Blick auf die X - Y Ebene dargestellt. Rechts ist jeweils eine Trajektorie mit Blick auf die X - Y Ebene und mit Blick auf die X - Z Ebene im Fahrzeugkoordinatensystem in vergrößerter Ansicht visualisiert. Wie deutlich zu erkennen ist, weisen die einzelnen Fahrzeugpunkte den in Kapitel 4.1 erläuterten systematischen Genauigkeitsverlust auf. Mit mittleren Punktfehlern von bis zu 30 mm ist dieses Ergebnis für die genaue Analyse der Aggregat- und Motorbewegungen und die damit verbundene Bewertung der Insassensicherheit und der Deformation der Fahrzeugstruktur nicht geeignet.

Des Weiteren ist in der rechten Detaildarstellung ein Bereich der Trajektorie zu erkennen, für den keine dreidimensionalen Punkte generiert werden konnten. Die Visualisierungssoftware verbindet sämtlich aufeinander folgende Punkte mit einer Linie, die in der Farbe der jeweilig angrenzenden Objektpunkte abgebildet wird. So stellt die Visualisierung auch in den Bereichen in denen keine Informationen für die räumliche Bewegung der Fahrzeugpunkte zur Verfügung stehen eine durchgängig erscheinende Trajektorie dar. Ursache für diese Lücken in den Trajektorien sind die durch die Strebe abgeschatteten Bereiche bei der Bildaufnahme [Kapitel 5.2.5].

5.2.2 Auswertung im Fotogrubensystem ohne Korrektur

Durch die Konstruktion eines hochgenauen Passpunktfeldes [Kapitel 4.2.2] in dem neu definierten Fotogrubenkoordinatensystem [Kapitel 4.2.3] ist in dem ersten Teilschritt der in diesem Kapitel durchgeführten Filmauswertung eine hochgenaue äußere Orientierung der verwendeten Kameras bestimmt worden [Tabelle 4-2]. Über diese positionierten und orientierten Kameras lässt sich in einem zweiten Schritt mit denselben unkorrigierten Bildkoordinaten, die auch in Kapitel 5.2.1 verwendet worden sind, eine Triangulation für jeden signalisierten Fahrzeugpunkt und für jeden Zeitschritt der Bildsequenzen durchführen. Als Ergebnis dieser Auswertung können dreidimensionale Trajektorien im Fotogrubenkoordinatensystem und ohne Berücksichtigung der Brechungseigenschaften für sämtliche Messpunkte generiert werden.

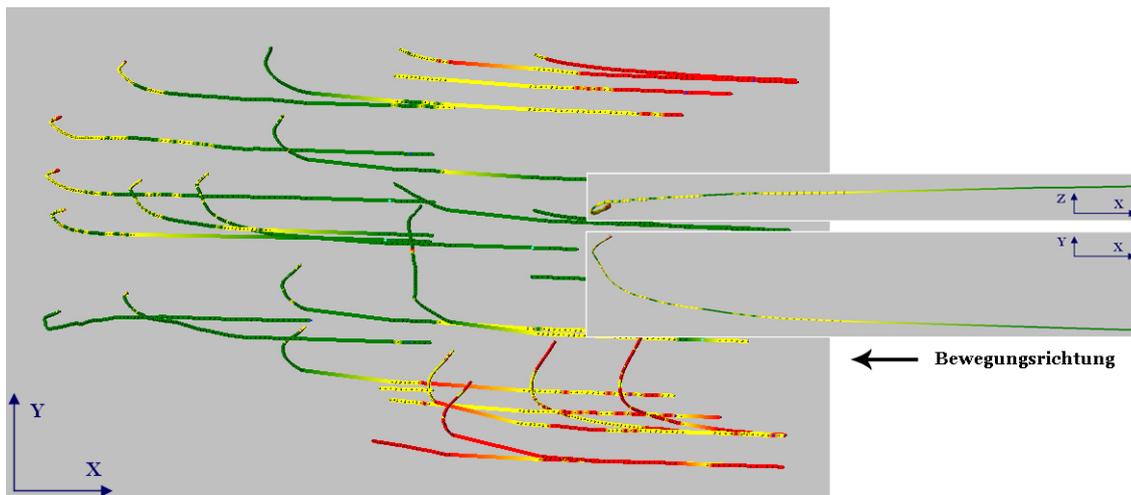


Bild 5-4 **Trajektorien Fotogrubensystem ohne Korrektur**
 Darstellung der dreidimensionalen Trajektorien für sämtliche Punkte auf der Fahrzeugunterseite nach einer Auswertung bezogen auf das Fotogrubenkoordinatensystem und ohne Korrektur der Acrylglasplatte.

Bild 5-4 zeigt das Ergebnis einer solchen Filmauswertung mit Blick auf die X - Y Ebene im Fotogrubenkoordinatensystem bei ungefähr gleicher Systemausrichtung wie beim Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 . In der Detailansicht einer beispielhaften Trajektorie ist ein Blick auf die X - Y Ebene und ein Blick auf die X - Z Ebene visualisiert. Wie deutlich zu erkennen ist, konnte der systematische Genauigkeitsverlust über die Aufnahmezeit durch die hochgenaue Bestimmung der äußeren Orientierung unabhängig von den Brechungseinflüssen der Acrylglasplatte beseitigt werden. Die proportional zum mittleren Punktfehler eingefärbten Trajektorien bestätigen die in Kapitel 4.3.1 diskutierten theoretischen Überlegungen. So ist im mittleren Bereich der Trajektorienpunktwolke ein mittlerer Punktfehler größtenteils unter 3 mm zu erreichen. Im Randbereich der Acrylglasplatte kommt es zu deutlich größeren Standardabweichungen bei der Punktbestimmung. Der Brechungseinfluss wirkt sich in diesen Bereichen nicht in der Epipolarebene aus, so dass die Bildkoordinaten nicht auf der jeweiligen Epipolarlinie verschoben werden. Demnach verlaufen die ohne Berücksichtigung des Brechungseinflusses konstruierten Abbildungsstrahlen bei Anwendung des räumlichen Vorwärtsschnitts im Randbereich der Acrylglasplatte windschief im Raum. Im mittleren Bereich erfahren die Bildkoordinaten einen Einfluss auf die Abbildungsgeometrie, der sich nach Bild 4-13 größtenteils in der Epipolarebene auswirkt. Als Ergebnis der dreidimensionalen Punktbestimmung stehen in diesen Bereichen Objektpunkte für jeden Zeitschritt der Bildsequenz mit einer geringen Standardabweichung zur Verfügung. Eine genaue Interpretation dieser Ergeb-

nisse ist von großer Bedeutung. Die mittleren Punktfehler unter 3 mm täuschen eine Genauigkeit vor, die in dieser Größenordnung absolut gesehen nicht eingehalten werden kann. Durch die Systematik des Brechungseinflusses sind die in Bild 5-4 visualisierten Trajektorien mit systematischen Abweichungen, die sich in der Mitte der Acrylglasplatte hauptsächlich in Z -Richtung und im Randbereich zusätzlich in X - und Y -Richtung auswirken, versehen.

5.2.3 Auswertung im Fotogrubensystem mit Korrektur einer Scheibe

Die Beseitigung der systematischen Einflüsse der Acrylglasplatte auf die Bildkoordinatenmessung wird durch das, in dieser Arbeit hergeleitete Verfahren, ermöglicht. Die in Bild 5-5 dargestellten Trajektorien der Fahrzeugunterbodenpunkte sind wie folgt berechnet worden: Nach einer Filmauswertung im Fotogrubenkoordinatensystem ohne Berücksichtigung der Acrylglasplatte [Kapitel 5.2.2] ist eine Korrektur der gemessenen Bildkoordinaten mit der implementierten Optimierungssoftware [Kapitel 4.4.2] durchgeführt worden. Die hier dargestellten Ergebnisse sind durch eine einfache Punktbestimmung mit den korrigierten Bildkoordinaten ohne iterative Anwendung des Verfahrens [Kapitel 4.4.3] erzielt worden. Des Weiteren ist für die Berechnung der radialen Fehlereinflüsse auf sämtliche Bildkoordinaten der Korrekturparametersatz für die vordere 80 mm dicke Acrylglasplatte angenommen worden, obwohl die Abbildungsstrahlen in der Realität sowohl durch die vordere 80 mm dicke als auch durch die hintere 50 mm dicke Acrylglasplatte verlaufen.

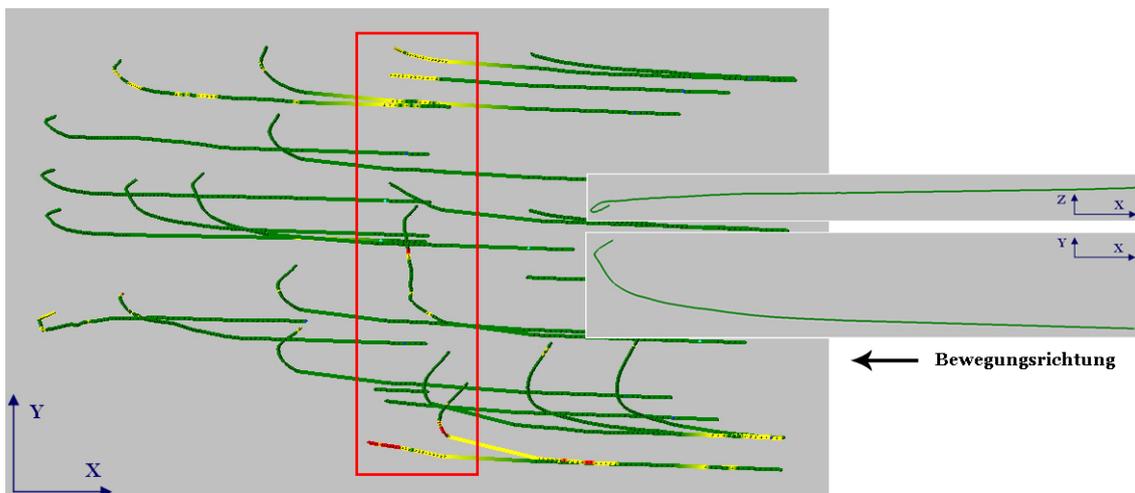


Bild 5-5 **Trajektorien Fotogrubensystem mit Korrektur einer Scheibe**
Darstellung der dreidimensionalen Trajektorien für sämtliche Punkte auf der Fahrzeugunterseite nach einer Auswertung bezogen auf das Fotogrubenkoordinatensystem und mit Korrektur einer Acrylglasplatte.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen eine eindeutige Verbesserung der mittleren Punktfehler über der gesamten Ausdehnung der Punktwolke. Besonders deutlich lässt sich dies in den Randbereichen erkennen, in denen die mittleren Punktfehler größtenteils von bis zu 15 mm auf unter 3 mm reduziert werden konnten. Neben den geringeren Standardabweichungen bei der Punktbestimmung wird durch die Korrektur der Bildkoordinaten zusätzlich der systematische Lageversatz der berechneten Objektpunkte beseitigt.

In Bild 5-6 wird für eine beispielhafte Trajektorie im mittleren Bereich der Acrylglasplatte zum einen die Verbesserung der mittleren Punktfehler und zum anderen die Beseitigung des syste-

matischen Lageversatzes deutlich. Wie in Bild 4-13 dargestellt, werden die Objektpunkte durch die vom Brechungseinfluss der Acrylglasplatte verfälschten Bildkoordinaten systematisch zu tief trianguliert.



Bild 5-6 Systematischer Versatz zwischen Trajektorien
Darstellung des systematischen Versatzes zwischen den berechneten Objektpunkten mit und ohne Berücksichtigung der Acrylglasplatte.

Die Ergebnisse in diesem Kapitel belegen die in Kapitel 4.3.1 aufgeführten theoretischen Überlegungen. So lässt sich ein systematischer Lageversatz von ungefähr 30 mm zwischen den Punktwolken mit [Bild 5-5] und ohne [Bild 5-4] Berücksichtigung des Brechungseinflusses nachweisen. Besonders im mittleren Bereich der Acrylglasplatte tritt eine systematische Abweichung ausschließlich in Z -Richtung auf. Im Randbereich sind diese Systematiken auch in X - und Y -Richtung zu beobachten. Die Punktwolke ohne Berücksichtigung der Brechungseinflüsse liegt somit über ihre gesamte Ausdehnung um einen systematischen Versatz von ungefähr 30 mm zu tief. Zusätzlich zu dieser Abweichung kommt es in den Randbereichen zu einer Stauchung der Trajektorien, die aus der Veränderung der Abbildungsstrahlen bezogen auf den Bezugspunkt der radialen Verschiebung [Kapitel 4.3.4] resultiert. Durch die Berücksichtigung der Brechungseigenschaften auf der Bildebene als radiale Verschiebung zum jeweiligen Bezugspunkt werden bei der Triangulation die systematischen Abweichungen in allen drei Koordinatenrichtungen beseitigt. Zusätzlich zur Beseitigung der systematischen Abweichungen können die Fahrzeugunterbodenpunkte nach der Bildkoordinatenkorrektur sowohl im mittleren als auch im Randbereich mit mittleren Punktfehlern von 1 mm bis 3 mm bestimmt werden.

Da sämtliche Bildkoordinaten für die Ergebnisse in diesem Kapitel mit dem Korrekturparametersatz der 80 mm dicken Acrylglasplatte korrigiert worden sind, müssen die in Bild 5-5 dargestellten Ergebnisse weiter analysiert werden. Die realen Gegebenheiten bei dem hier ausgewerteten Crashversuch machen eine Beobachtung sowohl durch die 80 mm als auch durch die 50 mm dicke Acrylglasplatte notwendig. Bei der Korrektur der Bildkoordinaten wird somit eine Modellerweiterung [Kapitel 4.5] um die 50 mm dicke Acrylglasplatte erforderlich. So muss für jeden Abbildungsstrahl geprüft werden, durch welche Acrylglasplatte er verläuft und mit welchem Parametersatz die zugehörigen Bildkoordinaten korrigiert werden müssen. Die Annahme, dass alle Abbildungsstrahlen durch die 80 mm dicke Acrylglasplatte beobachtet worden sind, führt zu zwei fehlerhaften Bereichen in der in diesem Kapitel vorgestellten Auswertung: Zum einen erhalten die Punkte, die aus einem Abbildungsstrahl durch die 80 mm und aus einem Abbildungsstrahl durch die 50 mm dicke Platte konstruiert werden, höhere Standardabweichungen, da die Strahlen durch die Korrektur im Raum windschief verlaufen [Bild 5-5 markierter Bereich]. Diese fehlerhafte Modellierung führt besonders in den Randbereichen zu größeren mittleren Punktfehlern. Des Weiteren werden die Punkte, die ausschließlich durch die 50 mm dicke Acrylglasplatte beobachtet werden, mit einem systematischen Versatz resultierend aus den 30 mm Differenz zwischen der tatsächlich im Strahlengang befindlichen und der angenommenen Acrylglasplatte trianguliert. Zur Beseitigung dieser beiden Fehlerquellen ist in Kapitel 4.5 eine Modellerweiterung um eine zusätzliche Acrylglasplatte vorgestellt worden, die für die Berechnung der im nächsten Kapitel folgenden Ergebnisse verwendet wird.

5.2.4 Auswertung im Fotogrubensystem mit Korrektur beider Scheiben

Da für den hier beispielhaft analysierten Crashversuch die Fahrzeugunterseite durch zwei Acrylglasplatten beobachtet wird, ist für die realitätsgetreue Modellierung eine Berücksichtigung beider Acrylglasplatten erforderlich [Kapitel 4.5]. Hierzu sind im Vorfeld beide Acrylglasplatten und die verbindende Strebe mit Messmarken signalisiert worden. Die Optimierungssoftware berechnet automatisch die gegenseitige Ausrichtung zwischen den Bildebenen und den Acrylglasplatten und die daraus resultierenden zwei Bezugspunkte für die radiale Verschiebung für jeden separaten Kamerastandpunkt. Anschließend wird für jeden Abbildungsstrahl geprüft durch welche Acrylglasplatte er verläuft und auf welchen Punkt sich die, mit dem jeweiligen Parametersatz berechnete radiale Korrektur beziehen muss. Bild 5-7 stellt das Ergebnis der dreidimensionalen Filmauswertung mit den so korrigierten Bildkoordinaten dar. Wie deutlich zu erkennen ist, konnten die Punkte in den Bereichen, in denen die Abbildungsstrahlen sowohl durch die 80 mm als auch durch die 50 mm dicke Acrylglasplatte verlaufen mit einer geringeren Standardabweichung als in Bild 5-5 bestimmt werden.

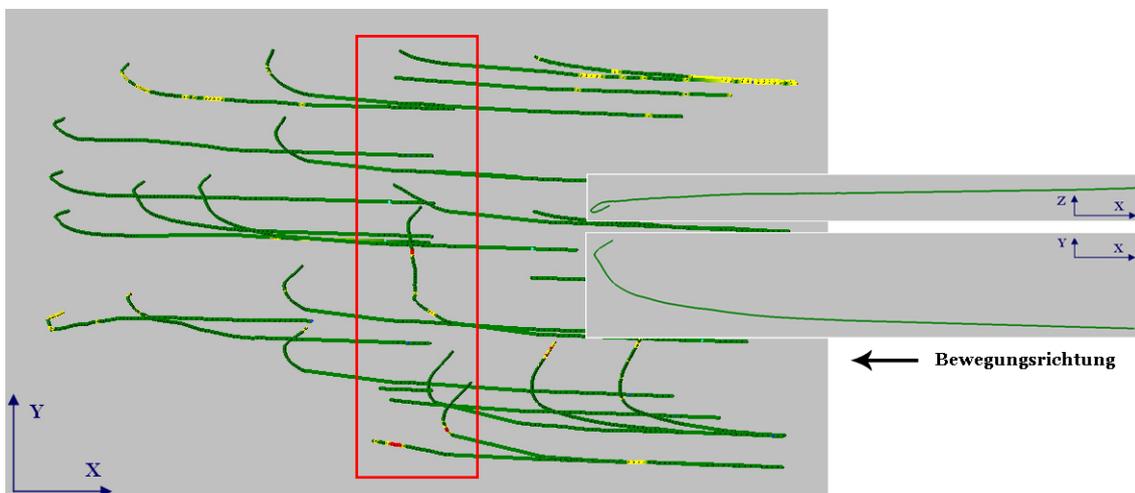


Bild 5-7 **Trajektorien Fotogrubensystem mit Korrektur beider Scheiben**
Darstellung der dreidimensionalen Trajektorien für sämtliche Punkte auf der Fahrzeugunterseite nach einer Auswertung bezogen auf das Fotogrubenkoordinatensystem und mit Korrektur beider Acrylglasplatten.

In Bild 5-8 sind die Unterschiede zwischen den Auswertungen mit der Berücksichtigung von einer und von beiden Acrylglasplatten in Detaildarstellungen visualisiert. Die linke Darstellung zeigt einen Blick auf die X - Y Ebene für vier beispielhafte Trajektorien in einem Bereich in dem die Abbildungsstrahlen durch die 80 mm und die 50 mm dicke Platte verlaufen. Die Genauigkeitssteigerung durch die Berücksichtigung beider Acrylglasplatten führt in diesem Bereich zu mittleren Punktfehlern von ungefähr 1 mm (Bild 5-8 links, rechte Abbildung).

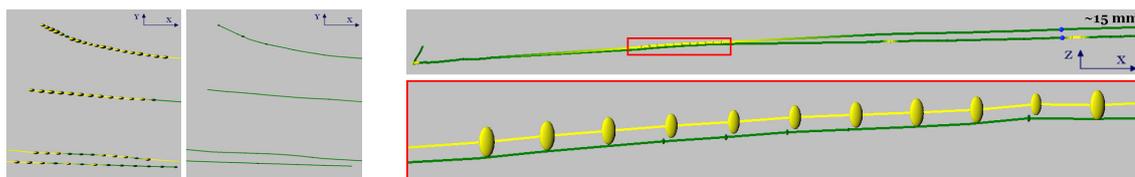


Bild 5-8 **Detaildarstellungen Trajektorienunterschiede**
Links: Darstellung unterschiedlicher Trajektorien durch die Auswertung mit Berücksichtigung einer Scheibe und mit Berücksichtigung beider Scheiben. Rechts ist ein Blick auf die X - Z Ebene für eine beispielhafte Trajektorie dargestellt.

Die mittleren Punktfehler bei der dreidimensionalen Auswertung mit Berücksichtigung von nur einer Scheibe liegen ungefähr im Bereich von 4 mm (Bild 5-8 links, linke Abbildung). In Bild 5-8 rechts ist der Blick auf die X - Z Ebene für eine beispielhafte Trajektorie abgebildet. Über diesen Trajektorienverlauf lassen sich die Auswirkungen durch die Berücksichtigung beider Acrylglasplatten anschaulich gut beschreiben. Die Trajektorien im vorderen Bereich der Messkurve weisen keine Unterschiede auf. Hier verlaufen beide Abbildungsstrahlen durch die 80 mm Acrylglasplatte. Die Annahme aus Kapitel 5.2.3 entspricht also den realen Gegebenheiten.

Der markierte und vergrößerte Bereich der Trajektorien stellt die Objektpunkte dar, die durch die 80 mm und die 50 mm dicke Scheibe trianguliert worden sind. In der Detailansicht lässt sich erkennen, dass die untere Trajektorie deutlich geringere Punktfehler aufweist und zudem systematisch tiefer liegt als die Trajektorie mit den größeren Punktfehlern. Für die Bestimmung der unteren Objektpunkte sind beide Acrylglasplatten berücksichtigt worden, so dass die Korrektur der Bildkoordinaten für die jeweilig durchlaufene Platte durchgeführt worden ist. Neben den geringeren Standardabweichungen bei der Punktbestimmung ist ein systematischer Versatz der Objektpunkte zu beobachten. Diese systematische Abweichung ist auch in dem hinteren Teil der Trajektorien zu erkennen, in dem die Objektpunkte ausschließlich durch die 50 mm dicke Platte beobachtet worden sind. Da die Abbildungsstrahlen in diesem Bereich insgesamt 30 mm weniger durch das Acrylglas verlaufen, kommt es zu einem geringeren Brechungseinfluss auf die Bildkoordinatenmessung. Werden die Bildkoordinaten mit einem angenommenen Brechungseinfluss einer 80 mm Platte korrigiert, erfahren sie eine zu große radiale Verschiebung. Hieraus resultiert eine fehlerhafte systematische Verschiebung der dreidimensionalen Punkte im Objektraum, die sich in Z – Richtung bis zu 15 mm auswirkt. Durch diese Ergebnisse wird deutlich, dass eine Berücksichtigung beider Acrylglasplatten für das Erreichen der geforderten Genauigkeit von 5 mm unumgänglich ist.

5.2.5 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Insgesamt lässt sich sagen, dass eine direkte Auswertung im Fahrzeugkoordinatensystem ohne Berücksichtigung der Brechungseigenschaften der Fotograbenabdeckung [Kapitel 5.2.1] zu keinen verwendbaren Ergebnissen führt, da der systematische Genauigkeitsverlust zu mittleren Punktfehlern von bis zu 30 mm führt.

Durch eine Auswertung im Fotograbenkoordinatensystem ohne Berücksichtigung der Acrylglasplatte [Kapitel 5.2.2] lassen sich Ergebnisse erzielen, die keinen systematischen Genauigkeitsverlust, wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, aufweisen. Vielmehr besitzen die triangulierten Punkte in den Randbereichen der Acrylglasplatte systematisch größere Punktfehler von bis zu 15 mm. Im mittleren Bereich der Acrylglasplatte hingegen wirkt sich der Brechungseinfluss innerhalb der Epipolarebene aus, so dass die Punkte mit geringen Punktfehlern unter 3 mm bestimmt werden können. Trotz dieser geringen Standardabweichungen sind die so erhaltenen Daten für eine genaue Analyse der Crashversuche nicht geeignet. Die dreidimensionalen Trajektorien unterliegen systematischen Abweichungen, die sich mit bis zu 30 mm hauptsächlich in Z -Richtung auswirken. Im Randbereich kommt es zusätzlich zu systematischen Abweichungen in X – und Y – Richtung. So machen neben den großen Punktfehlern in den Randbereichen von bis zu 15 mm die systematischen Abweichungen in den drei Koordinatenrichtungen eine Berücksichtigung der Brechungseinflüsse auf die Bildkoordinatenmessung erforderlich.

Für die Annahme, dass es sich bei der Fotograbenabdeckung um eine durchgehende Acrylglasplatte handelt, lassen sich nach der Korrektur der Bildkoordinaten mit der Optimierungssoftware die in Kapitel 5.2.3 aufgeführten Ergebnisse erzielen. Der systematische Einfluss der Acrylglasplatte konnte durch die Korrektur beseitigt werden, so dass die Punktwolke um ungefähr 30 mm in Z – Richtung höher liegt, in den Randbereichen in X – und Y – Richtung skaliert worden ist und die mittleren Punktfehler in allen Bereichen größtenteils unter 3 mm liegen. An zwei Stellen trifft die angenommene Berücksichtigung von einer durchgehenden Acrylglasplatte jedoch nicht zu und die Ergebnisse in diesen Bereichen müssen kritisch interpretiert werden. Die Abbildungsstrahlen, die nicht durch die angenommene 80 mm dicke Acrylglasplatte verlaufen, werden mit einem zu großen Brechungseinfluss korrigiert und wirken sich so fehlerhaft auf die Triangulation aus. Insgesamt wird in diesem Kapitel jedoch gezeigt, dass das entwickelte Verfahren auch in der Praxis zur Beseitigung der systematischen Einflüsse eines Mediums im Strahlengang und zu einer deutlichen Steigerung der Genauigkeit der Punktbestimmung führt. Für Crashversuche, bei denen die Fahrzeugunterseite nur durch eine Acrylglasplatte beobachtet wird, können durch die in Kapitel 5.2.3 durchgeführte Korrektur der Bildkoordinaten die Einflüsse der Acrylglasplatte beseitigt werden. Die Genauigkeiten bewegen sich anschließend in einem vergleichbaren Bereich wie jene für die Auswertung der Versuchsfilmoberhalb der Fotogrube ohne Acrylglasplatte im Strahlengang.

Für den hier beispielhaft analysierten Crashversuch ist jedoch eine Berücksichtigung beider Acrylglasplatten, durch die die Fahrzeugunterseite beobachtet wird, erforderlich. In Kapitel 5.2.4 sind die Ergebnisse dargestellt, die durch eine Bildkoordinatenkorrektur abhängig von der in der Realität durchlaufenen Acrylglasplatte erzielt worden sind. Die Ergebnisse in den kritischen Bereichen für die Annahme einer durchgehenden Acrylglasplatte sind durch die realitätsgetreue Modellierung weiter verbessert worden. So ist neben der Genauigkeitssteigerung der Punktbestimmung in den Bereichen, in denen die Abbildungsstrahlen durch beide Acrylglasplatten verlaufen, ein systematischer Versatz der Trajektorien, die lediglich durch die 50 mm Platte beobachtet worden sind, beseitigt worden. Durch die Berücksichtigung beider Acrylglasplatten bei der Bildkoordinatenkorrektur lässt sich eine homogene Genauigkeit der Objektpunkte im Bereich von 1 mm bis 3 mm für die gesamte Punktwolke erreichen. Zusätzlich sind die systematischen Einflüsse beider Acrylglasplatten beseitigt worden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in diesem Kapitel die praktische Anwendbarkeit des entwickelten Verfahrens nachgewiesen werden konnte. Durch die Optimierungssoftware wird eine vollautomatische Korrektur der Bildkoordinaten ermöglicht, so dass die Brechungseinflüsse der Acrylglasplatten ohne großen Mehraufwand eliminiert werden können. Durch die realisierte Berücksichtigung von zwei unterschiedlichen Acrylglasplatten können Genauigkeiten im Bereich von 1 mm bis 3 mm erreicht werden. Hierbei ist es für die erreichbare Genauigkeit und für den Mehraufwand bei der Bildkoordinatenkorrektur irrelevant ob der jeweilige Crashversuch durch lediglich eine oder durch beide Acrylglasplatten beobachtet wird. Die nach Beseitigung der Brechungseinflüsse zur Verfügung stehenden räumlichen Informationen der einzelnen Fahrzeugunterbodenpunkte liegen in einer hohen zeitlichen Auflösung und mit mittleren Punktfehlern deutlich unter 5 mm vor. Auf Grundlage dieser Daten ist eine genaue Analyse der Aggregat- und Motorbewegungen sowie der Deformation der Fahrzeugstruktur möglich.

Neben dem in diesem Kapitel vorgestellten Versuch sind für weitere Crashversuche dreidimensionale Filmauswertungen der Fahrzeugunterseite nach dem entwickelten Verfahren durchgeführt worden. Es konnten für alle bearbeiteten Versuche, sowohl für die Beobachtung durch eine als auch durch beide Scheiben, mittlere Punktfehler deutlich unter 5 mm erreicht und die systematischen Abweichungen beseitigt werden.

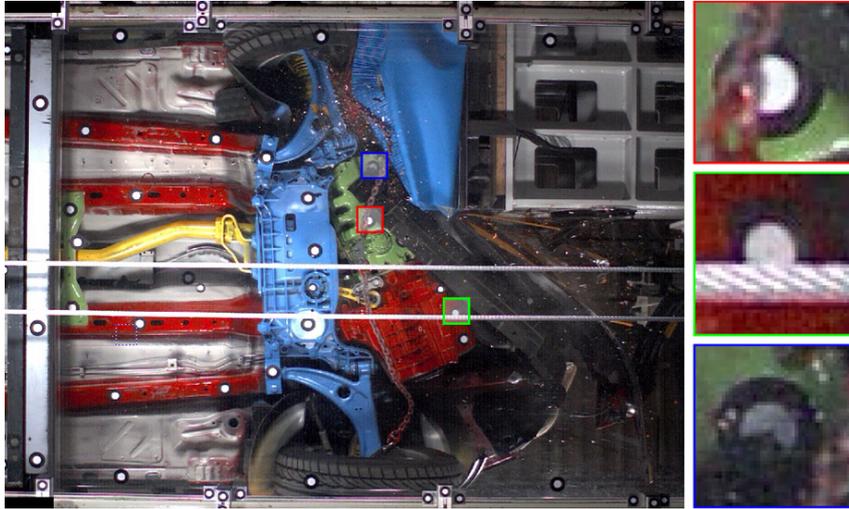


Bild 5-9 **Erschwerte Punktmessung**
Darstellung einer beispielhaften Aufnahme von Kamera U1 zur Verdeutlichung der erschwerten Bildkoordinatenmessung.

Die Bearbeitungen dieser Versuche haben jedoch auch gezeigt, dass sich die Auswertung der Fahrzeugunterseite besonders durch die aufwendige Messung der Bildkoordinaten von der bisher üblichen Auswertung der Fahrzeugoberseite unterscheidet. In Bild 5-9 sind beispielhafte Ursachen für die aufwendige und in manchen Bereichen manuell durchzuführende Bildkoordinatenmessung dargestellt. Eine Vielzahl von Störeffekten macht eine vollautomatische Bildkoordinatenmessung mit den verwendeten Bildverarbeitungsalgorithmen unmöglich. Die in der Regel kreis- oder ellipsenförmige Struktur der abgebildeten Messmarken wird durch Störungen, wie z. B. durch Fahrzeugbauteile, durch die Zugseile oder durch die Kette über die das Fahrzeug beschleunigt wird, beeinflusst. Der so erforderliche manuelle Messaufwand hat zur Folge, dass die Auswertung der Fahrzeugunterseite sehr zeitintensiv ist. Zusätzlich kommt es, durch die manuelle Messung der Bildkoordinaten, zu einer geringeren Bildkoordinatenmessgenauigkeit, so dass einige einzelne Trajektorienabschnitte auch nach der Berücksichtigung des Brechungseinflusses in Genauigkeitsbereichen zwischen 3 mm und 7 mm liegen.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Auswertung der Fahrzeugunterseite stellt die in manchen Crashversuchen aufgenommene Strebe zwischen den Acrylglasplatten dar. Bild 5-10 links zeigt schematisch die Auswirkungen der Strebe im Strahlengang der beiden seitlichen Kameras. Durch die Abschattungen kommt es auf jeder Abbildung zu einem großen verdeckten Bereich, der bei der Triangulation mit ausschließlich den beiden äußeren Kameras zu einer Lücke in der dreidimensionalen Trajektorie [Bild 5-10 rechts] führt.

Die aus den Abschattungen der Strebe resultierenden Trajektorienlücken umfassen im Objekt-raum eine Ausdehnung von bis zu 50 cm. In diesen Bereichen kann keine Aussage über die Aggregat- und Motorbewegungen und die Deformation der Fahrzeugstruktur getroffen werden.

Eine Möglichkeit diese Lücken zu schließen ist eine Interpolation im Objektraum zwischen den an die Lücken angrenzenden Punkten durchzuführen. Eine solche Interpolation über 50 cm kann jedoch zu fehlerhaften Interpretationen der Versuchsergebnisse führen. Die Überbrückung der Trajektorienlücken durch optimierte Auswerteverfahren kann somit keine zufrieden stellende Möglichkeit zur Berücksichtigung der Strebenabschattungen sein. Eine optimale Lösung für dieses Problem wäre die Konstruktion einer flexiblen Fotograbenabdeckung, die die Anpassung des Sichtbereiches ohne Strebe abhängig vom durchzuführenden Crashversuch ermöglicht. So könnten für sämtliche Crashversuchsarten durchgängige, dreidimensionale Trajektorien der Fahrzeugunterbodenpunkte mit einer, durch das entwickelte Korrekturverfahren erreichbaren Genauigkeit von 1 mm bis 3 mm generiert werden.

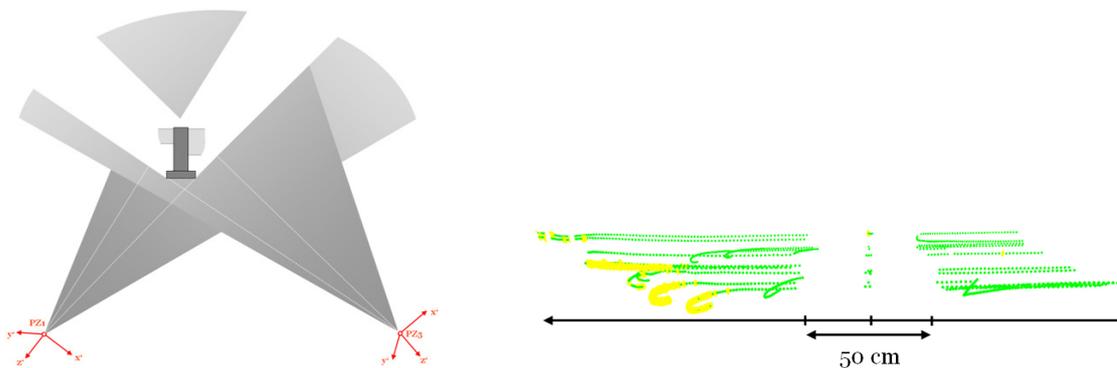


Bild 5-10 **Auswirkungen der Strebe zwischen den Acrylglasplatten**
 Links: Abschattungen durch die Strebe im Strahlengang; Rechts: aus den Abschattungen resultierende Lücken in den Trajektorien.

5.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel konnte das entwickelte Verfahren für die dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite anhand eines beispielhaften praktischen Versuches verifiziert werden. In einem ersten Abschnitt sind die verwendeten Hardwaresysteme vorgestellt worden. Neben den eingesetzten Kameras, der installierten Beleuchtungsanlage und den geklebten Zielmarken sind die Eigenschaften der Acrylglasplatten beschrieben worden. Hierbei stehen vor allem die Brechzahl und die Dicke der jeweiligen Acrylglasplatte im Fokus. Der zweite Abschnitt in diesem Kapitel fasst die erzielten Ergebnisse einer beispielhaften dreidimensionalen Filmauswertung der Fahrzeugunterseite mit vier unterschiedlichen Auswertestrategien zusammen. Anhand dieser Ergebnisse lassen sich die einzelnen Verbesserungen durch das entwickelte Verfahren aufzeigen, so dass dessen praktische Anwendbarkeit nachgewiesen werden kann. Abschließend können auf diese Weise dreidimensionale Trajektorien der Fahrzeugunterbodenpunkte mit einer vergleichbaren Genauigkeit wie für die dreidimensionale Auswertung oberhalb der Fotogrube generiert werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit ist ein neues Verfahren für die dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite im Crashversuch vorgestellt und anhand von praktischen Versuchen verifiziert worden.

Die Aufnahmen für diese Auswertungen erfolgen aus einer Fotogrube unterhalb des Fahrzeugs, die mit einer im Strahlengang befindlichen Acrylglasplatte abgedeckt ist. Somit werden die gemessenen Bildkoordinaten und die aus diesen Koordinaten triangulierten Fahrzeugpunkte um den systematischen Brechungseinfluss der Acrylglasplatte verfälscht. Erste Testauswertungen die direkt im Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 und ohne Berücksichtigung der Brechungseigenschaften durchgeführt worden sind, zeigen, dass solche Auswertungen zu keinen verwendbaren Ergebnissen führen. So sind zum einen die Parameter der äußeren Orientierung der Kameras mit Standardabweichungen von bis zu 30 mm [Tabelle 4-1] bestimmt worden. Zum anderen führt die mit diesen Kamerapositionen durchgeführte Triangulation zu systematischen Genauigkeitsverlusten der dreidimensionalen Fahrzeugpunkte mit mittleren Punktfehlern von bis zu 30 mm [Bild 4-2].

In einem ersten Schritt für die Realisierung einer dreidimensionalen Punktbestimmung an der Fahrzeugunterseite im Genauigkeitsbereich von 5 mm ist ein Passpunktfeld in der Fotogrube eingerichtet worden [Kapitel 4.2]. Die signalisierten Passpunkte auf den konstruierten Adaptern [Kapitel 4.2.2] sind in einem photogrammetrischen Aufnahmeverband im neu definierten Fotogrubenkoordinatensystem [Kapitel 4.2.3] hochgenau vermessen worden. Über dieses Passpunktfeld lassen sich die Orientierungsparameter der eingesetzten Kameras mit Standardabweichungen von 0,2 mm bis 1,8 mm bestimmen [Kapitel 4.2.5]. Die geeigneten Bereiche für Kamerapositionen sind durch eine theoretische Aufnahmeplanung und unter Berücksichtigung der sich aus der Praxis ergebenden Einschränkungen festgelegt worden [Kapitel 4.2.4].

Mit den hochgenauen Orientierungsparametern der Kamerapositionen als Grundlage ist in einem weiteren Schritt die allgemeine Modellierung der Brechungseinflüsse der Acrylglasplatte auf die Bildkoordinatenmessung [Kapitel 4.3] durchgeführt worden. Durch die Modellierung der Brechungseinflüsse auf der Bildebene kann die zentralperspektivische Abbildung für die korrigierten Bildkoordinaten wieder hergestellt werden. Bei der Bestimmung der Korrekturterme für die gemessenen Bildkoordinaten ist die gegenseitige Ausrichtung zwischen Bild- und Brechungsebene von entscheidender Bedeutung. Mit einer Genauigkeit von ungefähr $1/10$ Pixel kann für jede eingesetzte Kamera ein Bezugspunkt für die radial wirkenden Brechungseinflüsse abhängig von der gegenseitigen Ausrichtung zwischen Bild- und Brechungsebene bestimmt werden [Kapitel 4.3.4]. Über die Modellierung der gebrochenen Abbildungsstrahlen und unter Berücksichtigung des neuen Bezugspunktes für die radiale Verschiebung der Bildkoordinaten lassen sich abschließend Korrekturterme $\Delta x'$ und $\Delta y'$ für die einzelnen Messpunkte auf der Bildebene berechnen [Kapitel 4.3.8]. Auf diese Weise werden die Bildkoordinaten vom Brechungseinfluss der Acrylglasplatte bereinigt, so dass die auf dem Modell der Zentralperspektive basierenden Algorithmen ohne Genauigkeitsverlust verwendet werden können.

Um den operationellen Einsatz des entwickelten Verfahrens für die Auswertung der im Crashversuch aufgezeichneten Bildsequenzen der Fahrzeugunterseite zu gewährleisten ist eine Optimierungssoftware implementiert worden [Kapitel 4.4.2], die eine vollautomatische Korrektur sämtlicher gemessener Bildkoordinaten ermöglicht. So liefert die Optimierungssoftware für alle Kamerastandorte und für jeden Zeitschritt der aufgezeichneten Bildsequenzen vom Brechungseinfluss der Acrylglasplatte bereinigte Bildkoordinaten, über die durch eine erneute dreidimensionale Auswertung korrekte Objektkoordinaten bestimmt werden können. Des Weiteren bietet die Optimierungssoftware die Möglichkeit die Brechungseinflüsse von zwei unterschiedlichen Acrylglasplatten, die sich bei einigen Versuchsarten im Strahlengang befinden, zu berücksichtigen [Kapitel 4.5]. Hierbei wird für jede Acrylglasplatte ein separater Bezugspunkt für die Fehlereinflüsse der Lichtbrechung bestimmt. Anschließend wird auf der Bildebene geprüft, durch welche der beiden Acrylglasplatten jeder einzelne Abbildungsstrahl verläuft. Abhängig von diesem Ergebnis wird die Beseitigung der Brechungseinflüsse mit dem jeweiligen plattenspezifischen Korrekturparametersatz durchgeführt.

Neben der Verfahrensentwicklung ist eine detaillierte Untersuchung der möglichen Fehlerquellen, die aus dem Versuchsaufbau in der Fotogrube in Kombination mit dem entwickelten Verfahren auftreten können, durchgeführt worden [Kapitel 4.6]. Als Ergebnis dieser Analysen bleibt festzuhalten, dass sich die einzelnen Fehlerquellen, wie zum Beispiel die Durchbiegung der Fotogrubenabdeckung, in Größenordnungen im Bereich der erreichbaren Messgenauigkeit von 1/10 Pixel bewegen. So führen die Fehlerquellen einzeln betrachtet zu keinen erkennbaren Genauigkeitsverlusten bei der dreidimensionalen Punktbestimmung. In ihrer Gesamtheit können sie sich jedoch negativ auf die Ergebnisse für die Auswertung der Fahrzeugunterseite auswirken.

Zur Verifizierung des entwickelten Verfahrens sind mehrere Versuche mit vier unterschiedlichen Auswertestrategien bearbeitet und analysiert worden [Kapitel 5.2]. Durch den Vergleich dieser vier Auswertungen wird die erreichbare Verbesserung durch das neue Verfahren deutlich. Eine erste Auswertung, die direkt im Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 ohne Berücksichtigung der Brechungseinflüsse durchgeführt worden ist [Kapitel 5.2.1], führt zu systematischen Genauigkeitsverlusten der dreidimensionalen Fahrzeugpunkte mit mittleren Punktfehlern von bis zu 30 mm. Eine Auswertung mit den unkorrigierten Bildkoordinaten im Fotogrubenkoordinatensystem [Kapitel 5.2.2] führt zu systematischen Abweichungen von bis zu 30 mm hauptsächlich in Z -Richtung und zum anderen zu mittleren Punktfehlern in den Randbereichen der Acrylglasplatte von bis zu 15 mm. Durch diese Ergebnisse wird die Notwendigkeit zur Berücksichtigung der Brechungseinflüsse, über die die geforderte Genauigkeit von 5 mm eingehalten werden kann, belegt. Die Auswertungen der Versuche mit Berücksichtigung der Brechungseinflüsse nach dem entwickelten Verfahren führen zu Ergebnissen, die von den modellierten systematischen Einflüssen einer oder zwei Acrylglasplatten im Strahlengang bereinigt sind [Kapitel 5.2.3 und 5.2.4]. So werden zum einen die mittleren Punktfehler der triangulierten Punkte deutlich verringert und zum anderen die systematischen Abweichungen in allen drei Koordinatenrichtungen beseitigt. Als Ergebnis einer dreidimensionalen Auswertung der Fahrzeugunterseite lassen sich durch das neue Verfahren unabhängig davon, ob durch eine oder durch zwei Acrylglasplatten beobachtet wird, homogene Genauigkeiten über die gesamte Punktwolke zwischen 1 mm und 3 mm erreichen. Somit wird auf Grundlage dieser Daten eine präzise räumliche Beschreibung und Analyse der Aggregat- und Motorbewegungen im Crashversuch ermöglicht.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur photogrammetrischen Auswertung der Aggregatbewegungen im Sicherheitsversuch aus einer Fotogrube konnte durch experimentelle Versuche die Anwendbarkeit für die dreidimensionale Filmauswertung der Fahrzeugunterseite belegen. Durch die Berücksichtigung der Brechungseinflüsse auf der Bildebene wird eine dreidimensionale Auswertung ermöglicht, die von den systematischen Einflüssen der im Strahlengang befindlichen Acrylglasplatten bereinigt ist und so eine Objektkoordinatengenauigkeit von unter 5 mm realisierbar macht.

Über die Zielsetzung der Arbeit hinaus, können auf Grundlage der gesammelten Erfahrungen aus den durchgeführten Versuchsauswertungen der Fahrzeugunterseite folgende Empfehlungen für eine weitere Optimierung der Abläufe bei der Versuchsvorbereitung, der Versuchsdurchführung und der Versuchsauswertung gegeben werden:

VERSUCHSVORBEREITUNG

Eine Standardisierung für die Positionen und Bezeichnungen der relevanten Punkte an der Fahrzeugunterseite führt zu vereinfachten und schnelleren Abläufen bei der Ausrüstung der zu überprüfenden Fahrzeuge.

VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Der vorhandene Versuchsaufbau in der Fotogrube führt bei einigen Crashversuchsarten zu Abschattungen durch die Strebe [Bild 5-10] zwischen den unterschiedlichen Acrylglasplatten. Die Konstruktion einer flexiblen Fotogrubenabdeckung, die die Anpassung des Sichtbereiches ohne Strebe abhängig vom durchzuführenden Crashversuch ermöglicht, bietet die Möglichkeit für die unterschiedlichen Crashversuchsarten durchgängige dreidimensionale Trajektorien zu generieren.

VERSUCHSAUSWERTUNG

Die Überführung des Passpunktfeldes im Fotogrubenkoordinatensystem in das innerhalb der Versuchshalle realisierte Hallenkoordinatensystem bringt einige Vorteile mit sich. Wenn die Crashversuche eine dreidimensionale Auswertung der Fahrzeugoberseite im Hallenkoordinatensystem erhalten, würden die Ergebnisse der Auswertung der Fahrzeugunterseite ebenfalls in diesem Koordinatensystem vorliegen. Abschließend könnte durch eine gemeinsame räumliche Koordinatentransformation der Bezug zum Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt t_0 hergestellt werden. Aktuell werden die dreidimensionalen Trajektorien der Fahrzeugunterbodenpunkte über die Koordinaten der gemessenen Punkte zum Zeitpunkt t_0 in das Fahrzeugkoordinatensystem überführt. Da sich diese Punkte hauptsächlich in einer Ebene befinden, würde eine gemeinsame Koordinatentransformation eine deutliche Verbesserung der räumlichen Verteilung der Transformationspunkte mit sich bringen. Zudem wäre die Signalisierung und Auswertung von lediglich einzelnen Bauteilen, deren Bewegungen in der Regel mit nur drei Messmarken bestimmt werden können, möglich. Der Bezug zum Fahrzeugkoordinatensystem könnte in einem solchen Fall über die Punkte auf der Fahrzeugoberseite hergestellt werden.

Des Weiteren ist die Integration des entwickelten Verfahrens als Mehrmedienmodul in die verwendete Auswertesoftware denkbar. Eine interne und im Hintergrund ablaufende Korrektur der Bildkoordinaten würde direkt innerhalb der Auswertesoftware zu den von den Brechungseinflüssen der Acrylglasplatte bereinigten Ergebnissen führen.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [ARRI, 2007] ARRI GROUP: *Product Information – Daylight Lampheads Arrisun 40/25*. Produktübersicht, Zugriff unter <http://www.arri.de/entry/lighting.htm> am 22.02.2007.
- [BACHMANN, 2000] BACHMANN, M.: *Beitrag zur Verbesserung der Genauigkeitskenngrößen von Großmanipulatoren im Mehrmedieneinsatz mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie*, Leibniz Universität Hannover – Fachbereich Maschinenbau, Dissertation, 2000.
- [BIRKHOLZ, 2006] BIRKHOLZ KUNSTOFFWERK GMBH: *Datenblatt Acrylglasblock BK-117-06 – Werkstoff Plexiglas GS 222*, Heppenheim, 2006.
- [BREUER, 1987] BREUER, H.: *dtv – Atlas zur Physik*, München, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, 1987.
- [BROWN, 1971] BROWN, D.C.: *Close-Range Camera Calibration*. Photogrammetric Engineering 37(8), S. 855-866, 1971.
- [DEGUSSA AG, 2004] DEGUSSA AG, RÖHM GMBH & CO.KG, PLEXIGLAS®: *Produktbeschreibung – Richtwerte der Eigenschaften*. Degussa AG - Geschäftsbereich Plexiglas, Röhm GmbH & Co.KG, Darmstadt, 2004.
- [DEGUSSA AG, 2006] DEGUSSA AG, RÖHM GMBH & CO.KG, PLEXIGLAS®: *Optische Eigenschaften Plexiglas GS 222*. Degussa AG - Geschäftsbereich Plexiglas, Röhm GmbH & Co.KG, Darmstadt, 2006.
- [DRIXLER, 1993] DRIXLER, E.: *Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum*. München, DGK Reihe C, Heft Nr. 409, Dissertation, 1993.
- [FEYNMAN, 1990] FEYNMAN, R.P.: *QED – Die seltsame Theorie des Lichtes und der Materie*. Piper Verlag, 3. Auflage, 1990.
- [GODDING, 1993] GODDING, R.: *Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme*. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF), Heft 2/1993, S. 82-90, 1993.
- [GÖHRING, 2002] GÖHRING, D.: *Digitalkameratechnologien – CCD vs. CMOS*. Humboldt Universität Berlin, Fachbereich Technische Informatik, unveröffentlicht, 2002.
- [HECKEL ET AL., 2001] HECKEL, B.; UVA, A. E.; HAMANN, B.; JOY, K. I.: *Surface Reconstruction Using Adaptive Clustering Methods*. In: BRUNETT, G. (Hrsg.); BIERI, H. (Hrsg.); FARIN, G. (Hrsg.): *Geometric Modeling*. Wien, New York, Springer, S. 199-218, 2001.
- [HEIPKE, 1990] HEIPKE, C.: *Integration von Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie*. München, DGK Reihe C, Heft Nr. 366, Dissertation, 1990.
- [HINZ, 2004] HINZ, S.: *Automatische Extraktion urbaner Straßennetze*. München, DGK, Reihe C, Heft Nr. 580, Dissertation, 2004.
- [ISO 8721, 1986] INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION: *Road vehicles – Measurement techniques in impact tests – Optical instrumentation*. ISO 8721, 1986.

- [KECK, 2006] KECK, C.M.: *Optimierte Partikelgrößencharakterisierung & Orale Formulierungen*. Berlin, Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie der Freien Universität Berlin, Digitale Dissertation 512, 2006.
- [KÖLLER & SCHRADER, 1996] KÖLLER, P., SCHRADER, K.: *Beurteilung des Fehlers bei der Positionsbestimmung von Messmarken aus verlustbehaftet komprimierten Crashbildsequenzen*. Bonfig, K.W. (Hrsg.): *Messtechnik und Messsignalverarbeitung*, MessComp, S. 73-78, 1996.
- [KOTOWSKI, 1987] KOTOWSKI, R.: *Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel*. München, DGK Reihe C, Heft 330, Dissertation, 1987.
- [LUHMANN, 2000] LUHMANN, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, 2000.
- [MAAS, 1992] MAAS, H.-G.: *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik*. Zürich, ETH Nr. 9665, Dissertation, 1992.
- [NIEMEIER, 2002] NIEMEIER, W.: *Ausgleichsrechnung*. Berlin; New York, de Gruyter, 2002.
- [NIKON, 2007] NIKON: *Produktübersicht – AF Nikkor 24 mm*. Produktbilder, Zugriff unter http://www.nikon.de/product/de_DE/products/broad/387/views.html am 21.02.2007.
- [PELZER, 1985] PELZER, H.: (Hrsg.) *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*. Stuttgart, Konrad Wittwer Verlag, 1985.
- [RAGUSE ET AL., 2004] RAGUSE, K.; DERPMANN-HAGENSTRÖM, P.; KÖLLER, P.: *Verifizierung von Simulationsmodellen für Fahrzeugsicherheitsversuche*. Seyfert, E. (Hrsg.), Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 12, S. 367-374, 2004.
- [RAGUSE, 2007] RAGUSE, K.: *Dreidimensionale photogrammetrische Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren*. München, DGK Reihe C, Heft Nr. 602, Dissertation im Druck, 2007.
- [REDLAKE, 2007] REDLAKE: *MotionXtra HG-100K*. Datenblatt, 2007.
- [RIETDORF, 2004] RIETDORF, A.: *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. Berlin, Fakultät IV – Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, Dissertation, 2004.
- [SAE, 1995] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS: *Instrumentation of Impact Test – Part 2: Photographic Instrumentation*. SAE Standard J211/2, SAE – Society of Automotive Engineers, International, 1995.
- [WIGGENHAGEN & RAGUSE, 2003] WIGGENHAGEN, M.; RAGUSE K.: *Entwicklung von Kenngrößen zur Qualitätsbeurteilung optischer Prozessketten*. PFG – Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Nr. 2/2003, S. 125-134, 2003.
- [WIGGENHAGEN, 2006] WIGGENHAGEN, M.: *Optische 3D Messtechnik*. Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Vorlesungsskript, Kapitel: Bildorientierung im Nahbereich, 2006.

DANKE...

CHRISTIAN HEIPKE, MANFRED WIGGENHAGEN, CLAUS BRENNER, MICHAEL NIERYCHLO, MONIKA UND HUBERTUS ROLAND

...für die fachliche und persönliche Unterstützung während des Studiums.

DER VOLKSWAGEN AG, DEM INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND GEOINFORMATION UND FOLKE SANTEL

...für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit.

KARSTEN RAGUSE, MANFRED WIGGENHAGEN, PETER DERPMANN-HAGENSTRÖM, OLE VIETH, STEFAN DAUER, JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ UND UTA GOTTLOB

...für die Unterstützung und Hilfsbereitschaft bei der Diplomarbeit.

KARSTEN RAGUSE, CLAUDIA HAIG, MONIKA ROLAND, FRANK ROLAND, STEFFEN ROLAND UND UTA GOTTLOB

...für das Korrekturlesen.