

Diplomarbeit

Modellierung von Fahrzeuginnenräumen mittels 3D-Photogrammetrie

eingereicht an der

Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der

Westsächsischen Hochschule Zwickau

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: cand. ing.

K o l b ,

geb. am: 09.09.1997

M a x i m i l i a n

Studiengang Kraftfahrzeugtechnik

Studienschwerpunkt Karosseriebau

Ausgegeben von:

Prof. Dr. Klaus-Dieter Brösdorf

Erstbetreuer/Zweitbetreuer:

Prof. Dr. Brösdorf / Dr.-Ing. Jan Schubert

In dieser Diplomarbeit wird die Modellierung eines Fahrzeuginnenraums mittels 3D-Photogrammetrie behandelt. Dazu wird zunächst ein Überblick über die Unfallaufnahme und Unfallrekonstruktion gegeben. Anschließend wird die 3D-Photogrammetrie vorgestellt, wobei unter anderem die geschichtliche Entwicklung und die Anwendung in der Verkehrsunfallrekonstruktion aufgezeigt werden. Das Verfahren des Laserscanning, welches als Vergleich dienen soll, wird beschrieben. Fachliteratur zum Thema der 3D-Photogrammetrie in Fahrzeuginnenräumen wird zusammengefasst und kritisch gewürdigt. Anschließend sollen Versuche zur Modellierung eines Fahrzeuginnenraums mittels 3D-Photogrammetrie sowie Laserscanning und Aufnahmen mit einer Panoramakamera konzipiert, durchgeführt und schließlich ausgewertet werden. Die daraus entstehenden Versuchsergebnisse werden mit den Schlussfolgerungen der Literatur vergleichend betrachtet. Zum Schluss werden die Ergebnisse zusammengefasst und Ausblicke zum behandelnden Thema gegeben.

Selbstverständigkeitserklärung

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u. a. sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Neuenmarkt, 23.06.2023

Maximilian Kolb

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

I.	Verzeichnis der Bilder	I
II.	Verzeichnis der Tabellen	VII
III.	Verzeichnis der Anlagen	VIII
IV.	Kurzzeichenverzeichnis	IX
V.	Abkürzungsverzeichnis	X
1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung und Lösungsweg der Arbeit	2
2	Grundlagen der Unfallaufnahme und Unfallrekonstruktion	3
2.1	Unfallaufnahme	3
2.2	Beweissicherung	4
2.3	Fotografische Dokumentation	5
2.4	Vermessen von Unfallstelle und Spurenlage	6
2.4.1	Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren	7
2.4.2	Dreieck-Messverfahren	7
2.4.3	Vermessung von Kurven und Bögen.....	8
2.4.4	Messtischverfahren	9
2.4.5	Totalstation.....	10
2.4.6	Laserscanning.....	10
2.4.7	3D-Photogrammetrie.....	10
2.5	Sicht des Fahrers	11
2.6	Unfallrekonstruktion und Gutachtenerstellung.....	11
3	Photogrammetrie	13
3.1	Geschichtliche Entwicklung.....	13
3.2	Anwendungsbereiche der Photogrammetrie	19
3.3	Definition und Prozess der Photogrammetrie.....	22

Inhaltsverzeichnis

3.4 Mathematische Grundlagen	25
3.4.1 Kamerakalibrierung und innere Orientierung.....	25
3.4.2 Äußere Orientierung.....	27
3.4.3 Bündeltriangulation	28
3.5 Anwendung in der Verkehrsunfallrekonstruktion	30
3.5.1 2D-Photogrammetrie	30
3.5.2 3D-Photogrammetrie	31
4 Laserscanning	33
4.1 Verfahren des Laserscanning	33
4.1.1 Allgemein	33
4.1.2 Reflexion an Oberflächen.....	34
4.1.3 Orientierung und Kalibrierung	36
4.2 Anwendung in der Verkehrsunfallrekonstruktion	37
5 Literaturstudium mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen	40
5.1 Diplomarbeit Pfeiffer Philipp 2020	40
5.1.1 Vorbereitung und Durchführung der Versuche.....	40
5.1.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit	41
5.2 Studienarbeit Richter Philipp 2020	42
5.2.1 Vorbereitung und Durchführung der Versuche.....	43
5.2.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit	44
5.3 Diplomarbeit Helbig Frank 2021	45
5.3.1 Vorbereitung und Durchführung der Versuche.....	45
5.3.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit	46
5.4 Diplomarbeit Richter Philipp 2021	47
5.4.1 Vorbereitung und Durchführung der Versuche.....	48
5.4.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit	49

6 Konzeption der Versuche	50
6.1 Messfahrzeug.....	50
6.2 3D-Photogrammetrie.....	51
6.2.1 Equipment.....	51
6.2.2 Anfertigen der Bildserien.....	52
6.2.3 Software Reality Capture.....	53
6.2.3.1 Anforderungen.....	53
6.2.3.2 Workflow.....	54
6.3 Laserscanning.....	61
6.3.1 Equipment.....	61
6.3.2 Software FARO SCENE.....	63
6.4 Panoramakamera.....	69
6.4.1 Equipment.....	69
6.4.2 Versuchsplan.....	71
7 Vorbereitung und Durchführung der Versuche	71
7.1 3D-Photogrammetrie.....	71
7.2 Laserscanning.....	72
7.3 Panoramakamera.....	74
8 Auswertung der Versuche	76
8.1 3D-Photogrammetrie.....	76
8.2 Laserscanning.....	78
8.3 Panoramakamera.....	79
8.4 Vergleichende Betrachtung zu den angewandten Verfahren.....	80
9 Vergleichende Betrachtung der Versuchsergebnisse zur Literatur	84
10 Zusammenfassung und Ausblick	85
11 Literatur	88
Anlagen	92

Verzeichnis der Bilder

I. Verzeichnis der Bilder

Bild	Titel	Seite
Bild 1	Unfall und Unfallerhebung [5]	Seite 3
Bild 2	Panoramaaufnahme Verkehrsunfall [7]	Seite 6
Bild 3	Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren [6]	Seite 7
Bild 4	Dreieck-Messverfahren [6]	Seite 7
Bild 5	Dreieck-Messverfahren von Kurven [6]	Seite 8
Bild 6	Sehnen-Höhen-Messverfahren von Kurven [6]	Seite 8
Bild 7	Sehnen-Höhen-Messverfahren [6]	Seite 9
Bild 8	Tachymeter [18]	Seite 10
Bild 9	Albrecht Maydenbauer [12]	Seite 13
Bild 10	Signet der Königlichen Messbildanstalt Berlin [12]	Seite 13
Bild 11	Bildmesstheodolite von Finsterwald (1895) und Zeiss Jena (ca.1904) [10]	Seite 14
Bild 12	Stereokomparator nach Pulfrich (Zeiss, ab 1901) [10]	Seite 14
Bild 13	Messkammer Zeiss TMK 6 (links) [10]	Seite 15
Bild 14	Stereomesskammern Zeiss SMK 40 und SMK 120 (rechts) [10]	Seite 15
Bild 15	Analytischer Stereoplotter Zeiss Planicomp (ca. 1980) [10]	Seite 16
Bild 16	Teilmesskamera Rolleiflex SLX (ca.1980) [10]	Seite 16
Bild 17	Online-Mehrbildsystem Mapvision [10]	Seite 17
Bild 18	Zeiss Indusurf (1987) [10]	Seite 17
Bild 19	Videokamera Kodak DCS 460 (links) [10]	Seite 18
Bild 20	Online-Industriemesssystem GSI V-STARS (rechts) [10]	Seite 18

Verzeichnis der Bilder

Bild 21	Photogrammetrische Abbildung [11]	Seite 22
Bild 22	Vom Objekt zum Ergebnis [10]	Seite 23
Bild 23	Vom Objekt zum Modell [10]	Seite 24
Bild 24	Parameter der inneren Orientierung [13]	Seite 25
Bild 25	Verzeichnung in Abhängigkeit von der Blendenlage [13]	Seite 26
Bild 26	Moustache-Verzeichnung [14]	Seite 27
Bild 27	Kissen- und tonnenförmige Verzeichnung in einem aufgenommenen Bild [13]	Seite 27
Bild 28	Bündeltriangulation [10]	Seite 28
Bild 29	Mehrbildverband zur Vermessung einer Autotür [10]	Seite 29
Bild 30	Zweidimensionale photogrammetrische Vermessung einer Unfallstelle [19]	Seite 30
Bild 31	Zweidimensionale verzerrte photogrammetrische Vermessung einer Unfallstelle [19]	Seite 30
Bild 32	Verknüpfung der beiden dreidimensionalen Photogrammetriemodellen [19]	Seite 31
Bild 33	Aufnahme des Fahrzeugs vor und nach dem Versuch [19]	Seite 32
Bild 34	Versuchsdurchführung des Crashes [19]	Seite 32
Bild 35	Kollisionsbeschädigung am gestoßenen Fahrzeug [19]	Seite 32
Bild 36	Modellbildung des beschädigten Fahrzeugs mit Verlauf der Deformation [19]	Seite 33
Bild 37	Unterschiedliche Oberflächenreflexionen. (a) Spiegelnde Reflexion, (b) Diffuse Reflexion, (c) Diffuse Reflexion mit Spiegelung [17]	Seite 34
Bild 38	FARO Focus 3D-Laserscanner [21]	Seite 37
Bild 39	3D-Punktwolke in Farbe, erzeugt aus zwei Scanpositionen [21]	Seite 38
Bild 40	3D-Farbscan mit dem Scanner FARO Focus [21]	Seite 39

Verzeichnis der Bilder

Bild 41	Texturiertes Modell vom ersten Aufnahmetag (links) [8]	Seite 42
Bild 42	Texturiertes Modell vom zweiten Aufnahmetag (rechts) [8]	Seite 42
Bild 43	Texturiertes 3D-Modell vom Fahrzeuginnenraum des Opel Corsa im sechsten Versuch [23]	Seite 45
Bild 44	Straßenverlauf/ fiktiver Ort der Versuchsreihen [25]	Seite 48
Bild 45	Bilderserie Versuchsfahrzeug	Seite 50
Bild 46	Marker für den Versuch	Seite 51
Bild 47	Startmenü RealityCapture	Seite 54
Bild 48	Layouteinstellungen RealityCapture	Seite 54
Bild 49	Bilder hinzufügen in RealityCapture	Seite 55
Bild 50	Hinzugefügte Bilder in RealityCapture	Seite 55
Bild 51	Marker erkennen in RealityCapture	Seite 56
Bild 52	Start Alignment	Seite 57
Bild 53	Erstellte Punktwolke mit erkannten Markern	Seite 57
Bild 54	1D-Ansicht der ausgewählten Komponente	Seite 58
Bild 55	Eingrenzung des Rekonstruktionsbereichs	Seite 58
Bild 56	Rekonstruktionsergebnis in normaler Qualität	Seite 59
Bild 57	1D-Ansicht des Modells	Seite 59
Bild 58	Kolorieren-Button	Seite 60
Bild 59	Texturiertes Modell	Seite 60
Bild 60	Handgeführter FARO Freestyle 2 Scanner	Seite 62
Bild 61	Schild mit FARO-Markern	Seite 62
Bild 62	FARO-Marker im Fahrzeuginnenraum	Seite 62
Bild 63	Oberfläche FARO SCENE	Seite 63
Bild 64	Importieren von Daten in FARO SCENE	Seite 64

Verzeichnis der Bilder

Bild 65	Scans auswählen in FARO SCENE	Seite 64
Bild 66	Verarbeitung konfigurieren in FARO SCENE (1)	Seite 65
Bild 67	Verarbeitung konfigurieren in FARO SCENE (2)	Seite 65
Bild 68	Registrierung des Scans in FARO SCENE	Seite 66
Bild 69	Methode „Cloud-to-Cloud“ in FARO SCENE (links)	Seite 66
Bild 70	Methode „Zielmarkenbasiert“ in FARO SCENE (rechts)	Seite 66
Bild 71	Manuelle Registrierung in FARO SCENE	Seite 67
Bild 72	Erkunden des Scans in FARO SCENE	Seite 68
Bild 73	Eingrenzung des Rekonstruktionsbereichs mit einer „Clipping Box“ in FARO SCENE	Seite 68
Bild 74	Projektpunktwolke erstellen in FARO SCENE	Seite 69
Bild 75	Berechnete 3D-Punktwolke in FARO SCENE	Seite 69
Bild 76	CLAUSS piXplorer 100 [41]	Seite 70
Bild 77	Horizontalstativ „Slide Boom“ von CLAUSS (links) [42]	Seite 71
Bild 78	Panoramastativ der Firma CLAUSS (rechts) [43]	Seite 71
Bild 79	Im Fahrzeuginnenraum verteilte Marker	Seite 72
Bild 80	Schild mit Markern vor dem Fahrzeug	Seite 73
Bild 81	Scanvorgang durch geöffnete Fahrertür	Seite 74
Bild 82	Durch das Fahrertürfenster geführtes Panoramasytem	Seite 74
Bild 83	Durch die Beifahrertür geführtes Panoramasytem	Seite 75
Bild 84	Panoramasytem auf Panoramastativ im hinteren Fahrzeugbereich	Seite 75
Bild 85	Erstellte Punktwolke zum Versuch der 3D-Photogrammetrie	Seite 76
Bild 86	Aufnahmeserie zum Ergebnis des Versuchs zur 3D-Photogrammetrie	Seite 77
Bild 87	Aufnahmeserie zum Ergebnis des Versuchs zum Laserscanning	Seite 79

Verzeichnis der Bilder

Bild 88	Datenbasisbaum in CloudCompare	Seite 80
Bild 89	Funktion „Scale/Multiply“ in CloudCompare	Seite 80
Bild 90	Ausrichten der Punktwolke mit der Funktion „Translate, Rotate“	Seite 81
Bild 91	Wechselseitige Auswählen der markanten Punkte in den Punktwolken	Seite 81
Bild 92	Abweichungen der Punktwolken in einer Farbskala	Seite 82
Bild 93	Histogramm der absoluten Distanzfehler der Punktwolken	Seite 83
Bild 94	Datenblatt FARO Focus (1) [22]	Seite 95
Bild 95	Datenblatt FARO Focus (2) [22]	Seite 96
Bild 96	Kamera Canon EOS 6D Seite [28]	Seite 97
Bild 97	Bild 96: Kamera Canon EOS 6D Front [28]	Seite 97
Bild 98	Technische Daten Canon G7X [23]	Seite 98
Bild 99	Bild 98: Technische Daten Nikon D3100 [23]	Seite 99
Bild 100	Punktplatten matt und glänzend (links) [24]	Seite 101
Bild 101	Punktplatte vermessen mit Tachymeter (rechts) [24]	Seite 101
Bild 102	Position Punktplatten [24]	Seite 101
Bild 103	GeoMax Zoom90 [24]	Seite 102
Bild 104	FARO FOCUS M 70 [24]	Seite 103
Bild 105	DJI Phantom FC300X [24]	Seite 104
Bild 106	Objektiv Canon EF 16-32mm f/2.8L II USM [29]	Seite 105
Bild 107	FARO Freestyle 2 Datenblatt (1) [37]	Seite 104
Bild 108	FARO Freestyle 2 Datenblatt (2) [37]	Seite 107
Bild 109	Datenblatt FARO SCENE-Software (1) [38]	Seite 108
Bild 110	Datenblatt FARO SCENE-Software (2) [38]	Seite 109

Verzeichnis der Bilder

Bild 111	Datenblatt Objektiv Samyang XP 10mm f/3.5 Canon EF [40]	Seite 110
Bild 112	Datenblatt CLAUSS piXplorer 100 [41]	Seite 111
Bild 113	Ordnerstruktur Modelldaten und Bilder	Seite 112

Verzeichnis der Tabellen

II. Verzeichnis der Tabellen

Tabelle	Tabellenname	Seite
Tabelle 1	Geräte und Verfahren zur Vermessung von Unfallstellen [6, Seite 36]	Seite 6
Tabelle 2	Auswertung nach verwendetem Objektiv [25]	Seite 49
Tabelle 3	Daten zur Unfallrekonstruktion [6, Seite 28]	Seite 92
Tabelle 3 (Fortsetzung)	Daten zur Unfallrekonstruktion	Seite 94
Tabelle 4	Geräte zur Sicherung von objektiven Merkmalen [6, Seite 35]	Seite 93
Tabelle 5	Daten Canon EOS 6D [8], [28]	Seite 97
Tabelle 6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Studienarbeit von Herrn Richter Philipp [23]	Seite 100
Tabelle 7	Datenblatt Objektiv Canon EF 16-32mm f/2.8L II USM [8], [29]	Seite 105

Verzeichnis der Anlagen

III. Verzeichnis der Anlagen

Anlage	Titel	Seite
Anlage 1	Daten zur Unfallrekonstruktion [6, Seite 28]	Seite 92
Anlage 2	Anlage 2: Geräte zur Sicherung von objektiven Merkmalen [6, Seite 35]	Seite 94
Anlage 3	Faro Focus Datenblatt [22]	Seite 95
Anlage 4	Datenblatt Kamera Canon EOS 6D	Seite 97
Anlage 5	Technische Daten Canon G7X [23]	Seite 98
Anlage 6	Technische Daten Nikon D3100 mit Objektiv AF-S Nikkor 18-105 mm [23]	Seite 99
Anlage 7	Zusammenfassung der Ergebnisse der Studienarbeit von Herrn Richter Philipp [23]	Seite 100
Anlage 8	Punktplatten [24]	Seite 101
Anlage 9	Tachymeter GeoMax Zoom90 [24]	Seite 102
Anlage 10	3D-Laserscanner FARO FOCUS M70 [24]	Seite 103
Anlage 11	Drohne DJI Phantom FC300X [24]	Seite 104
Anlage 12	Datenblatt Objektiv Canon EF 16-32mm f/2.8L II USM [29]	Seite 105
Anlage 13	Datenblatt FARO Freestyle 2 Handscanner [37]	Seite 106
Anlage 14	Datenblatt FARO SCENE-Software [37]	Seite 108
Anlage 15	Datenblatt Samyang XP 10mm f/3.5 Canon EF [39]	Seite 110
Anlage 16	Datenblatt CLAUSS piXplorer 100 [41]	Seite 111
Anlage 17	Ordnerstruktur Modelldaten und Bilder	Seite 112

IV. Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
R	mm	Radius
H	mm	Höhe
S	mm	Sehne
O'	-	Projektionszentrum
c	-	Kamerakonstante
H'	-	Bildhauptpunkt
$x'_0, y'_0, z' = -c$	mm	Lage des Projektionszentrums im Bild
x', y'	mm	Gemessene Bildkoordinaten
$\Delta x', \Delta y'$	mm	Korrekturwerte für Abbildungsfehler
X, Y, Z	-	Koordinaten des Objektpunktes
r_{ij}	-	Koeffizienten der Rotationsmatrix
X_0, Y_0, Z_0	mm	Koordinaten des Projektionszentrums im übergeordneten Koordinatensystem
$\Delta r'$	mm	Verzeichnung (radial-symmetrisch)

Abkürzungsverzeichnis

V. Abkürzungsverzeichnis

KFZ	Kraftfahrzeug
Ifu	Institut für Unfallanalyse
3D	Dreidimensional
2D	Zweidimensional
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
CAD	Computer-Aided-Design
Etc.	Et cetera
PC	Personal Computer
Pixel	Englisch für Bildpunkt
DGM	Digitale Geländemodelle
BIM	Building Information Modeling
Usw.	Und so weiter
PKW	Personenkraftwagen
Km/h	Kilometer pro Stunde
°	Grad
z.B.	Zum Beispiel
LiDAR	Light Detection and Ranging
RADAR	RAdio Detection And Ranging
Mm	Millimeter
µm	Mikrometer
M	Meter
Cm	Zentimeter
Iso	International Organization for Standardization
CPU	Central Processing Unit, „Hauptprozessor“

Abkürzungsverzeichnis

GPU	Graphics Processing Unit, „Grafikprozessor“
RAM	Random Access Memory, „Arbeitsspeicher“
GB	Gigabyte
ddr 3/4	Double Data Rate
ssd	Solid State Drive
Ppi	Pay Per Input
CUDA	Compute Unified Device Architecture
Hdr	High Dynamic Range
VR	Virtual Reality
°C	Grad Celsius
Ca.	Circa

Vorwort

Vorwort

In dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich sowohl persönlich als auch fachlich bei der Erarbeitung dieser Diplomarbeit geholfen haben.

Ich bedanke mich bei Herrn Skoruppa der Firma FARO, der den Laserscanner kostenlos zur Verfügung gestellt hat und am Versuchstag selbst erschien und die Arbeiten mit dem Scanner durchgeführt hat. Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Clauss, der den Versuchsort, die Panoramakamera mit Stativen und das Versuchsfahrzeug stellte.

Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Klaus-Dieter Brösdorf für die Ausgabe des interessanten Themas und die stets freundliche und hilfsbereite Betreuung beim gesamten Prozess dieser Diplomarbeit.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und ganz besonders meinen Eltern bedanken, die mir dieses Studium ermöglicht haben und mich dabei jederzeit unterstützt haben.

1 Einleitung

Im Jahr 2022 ereigneten sich in Deutschland insgesamt 2.403.336 polizeilich erfasste Verkehrsunfälle, davon 2037.728 mit Sachschäden und 287.752 mit Personenschäden. [1] Da dies nur die Gesamtzahl der von der Polizei erfassten Unfällen darstellt, dürfte die Dunkelzahl weitaus größer sein. Denn viele, vor allem kleinere Vergehen, werden oftmals nicht von Behörden registriert. Seit 2021 werden immer mehr Unfälle, im Vergleich zum Vorjahr, aufgenommen, da es in den Jahren 2019 und 2020 aufgrund der niedrigeren Mobilität während der Coronapandemie weniger Verkehrsunfälle zu verzeichnen gab. [2] Im Jahr 2021 betrugen die Beiträge für KFZ-Versicherungen jeglicher Art insgesamt 29.072.000.000 €, davon leisteten die Versicherer insgesamt 24.321.000.000 €. [3] Bei dieser immensen Summe kommt es laut ifu (Institut für Unfallanalyse) Hamburg bei Kfz-Kaskoversicherungen bei 5,5 % und bei Kfz-Haftpflichtversicherungen sogar bei 7.3 % zum zugegebenen Versicherungsbetrag. [4] Würde man nur von der kleineren Prozentzahl der Kaskoversicherten ausgehen wären dies 1.453.600.000 € im Jahr, die Kfz-Versicherungen aufgrund von Betrug jährlich auszahlen. Daher ist es wichtig, dass Versicherungen, aber auch Unfallbeteiligte, in Verdachtsfällen Kfz-Sachverständige, neben der polizeilichen Aufklärung, beauftragen. Deren Aufgabe ist es Unfallschäden zu bewerten, den Unfallhergang zu prüfen und zu dokumentieren. Aussagekräftige Gutachten zeichnen sich oft dadurch aus, dass beispielsweise aufgrund des Spurenbilds mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit der Unfallablauf rekonstruiert werden kann. [6] Dies kann durch teils sehr zeitaufwändige zweidimensionale Vermessungen und späteren Berechnungen am Computer geschehen. In den letzten Jahren kam es jedoch zum Durchbruch in der Softwareentwicklung zur 3D-Photogrammetrie, mit der es mit einfachen Mitteln möglich ist 3D-Modelle zu rekonstruieren und mit diesen den Unfallhergang zu simulieren. Dabei ist ein Gutachten mit fotorealistischen 3D-Modellen weitaus aussagekräftiger als zweidimensionale Unfallskizzen. Herr PFEIFFER [8] versuchte in seiner Diplomarbeit herauszufinden, inwiefern es möglich ist mithilfe des Verfahrens der 3D-Photogrammetrie, geeignete 3D-Modelle von Fahrzeuginnenräumen darzustellen. Im Anschluss an diese Arbeit soll dies, im Vergleich mit anderen Verfahren, weiter untersucht werden.

1.1 Zielsetzung und Lösungsweg der Arbeit

Zunächst sollen die Grundlagen der Unfallaufnahme und Unfallrekonstruktion aufgezeigt werden. Anschließend wird die Photogrammetrie von der geschichtlichen Entwicklung bis zu mathematischen Grundlagen und der Anwendung in der Verkehrsunfallrekonstruktion erklärt. Das Verfahren und die Anwendung des Laserscannings in der Verkehrsunfallrekonstruktion wird beschrieben. Danach wird die Fachliteratur zur dreidimensionalen Erfassung von Fahrzeuginnenräumen, mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen, ausgewertet. Versuche zur dreidimensionalen Erfassung von Fahrzeuginnenräumen mittels 3D-Photogrammetrie, sowie Laserscanning zum Vergleich, sollen konzipiert werden. Die Versuche werden vorbereitet, durchgeführt und anschließend ausge- und bewertet. Die Versuchsergebnisse werden mit den Ergebnissen der Literatur vergleichend betrachtet. Die Diplomarbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick für künftige Untersuchungen.

2 Grundlagen der Unfallaufnahme und Unfallrekonstruktion

2.1 Unfallaufnahme

Nach einem Unfall werden direkt am Unfallort Unfallaufnahmen bzw. die Unfallaufnahme vorgenommen. Dies erfolgt in der Regel durch die Polizei, selten werden Sachverständige zur Unfallrekonstruktion zur Beweissicherung dazu genommen. Ziel dabei ist es alle „Spuren“, „Daten“, „Anknüpfungstatsachen“ zu erfassen, wie beispielsweise Reifenspuren und Fahrzeugbeschädigungen (siehe Bild1). Es wird versucht, so viele Daten wie möglich in einem vorgegebenen Rahmen aufzunehmen. Unterteilt wird dabei in vier Unfallphasen:

- Einlaufphase
- Kollisionsphase
- Auslaufphase

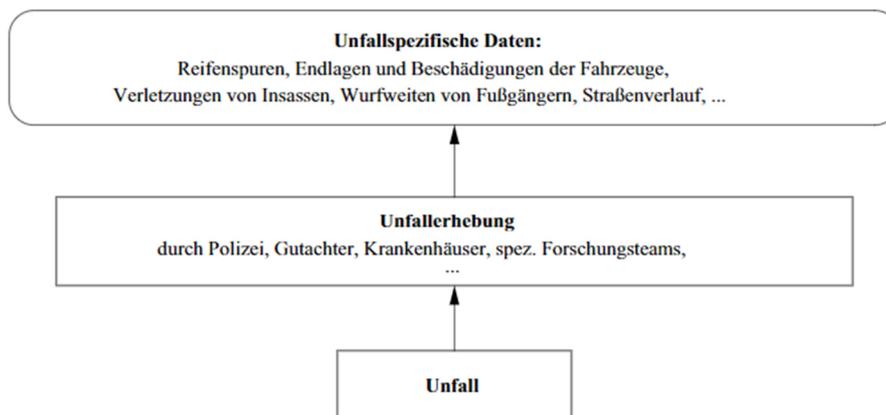


Bild 1: Unfall und Unfallaufnahme [5]

Für die spätere Unfallrekonstruktion sind einige dieser unfallspezifischen Daten besonders wichtig, andere eher überflüssig. Besonders wichtig sind beispielsweise Reifenspuren auf der Straße, die Einlauf- und Auslaufrichtungen, die Endlagen von Fahrzeugen oder Fußgängern und der Kollisionsort. Diese werden in der Regel in einer genauen Unfallskizze zusammengefasst. Je nach aufnehmender Institution, wie die Polizei, und Unfallschwere sind Umfang und Tiefe der Daten je nach Auftrag

Grundlagen der Unfallaufnahme und Unfallrekonstruktion

sehr unterschiedlich. Wenn ein Sachverständige zur Hilfe genommen wird, ermittelt dieser neben den genannten allgemeinen Unfalldaten weitere Angaben, die in Anlage 1 aufgelistet sind. [5, Seite 28-30], [6, Seite 28]

2.2 Beweissicherung

Bei der Beweissicherung ist bei den meisten Daten aus praktischer Erfahrung der Unfallaufnahme folgende Reihenfolge am sinnvollsten:

„fotografieren → abkreiden → fotografieren → vermessen“ [6, Seite 29]

Durch sofortiges Fotografieren wird eine Verschiebung oder Veränderung der Spuren verhindert. Die Spuren sollten nicht durch Kreidespuren verdeckt werden. Beschriebene und vermessene Spuren und Fotos, woraus gegebenenfalls später die Vermessung geprüft werden kann, sind Daten mit hoher Qualität. Die anschließende Vermessung ersetzt dabei jedoch nicht die Fotografie. Bei nasser Fahrbahn oder Dunkelheit sind die Spuren zu einem späteren Zeitpunkt zu begutachten. Für die polizeiliche Beweissicherung sind folgende Anmerkungen zu machen:

Ortsbesichtigung durchführen, fehlende Informationen wie beispielsweise Verkehrsregelung, Fahrspurmarkierungen, usw. ergänzen. Die Kollisionsstelle ist in die Unfallskizze einzutragen und dabei zu prüfen, ob die Lage vermutet wurde oder die Daten als sicher anzusehen sind (Zeugenaussagen, Fahrbahns Spuren). Weiterhin ist zu prüfen, ob die Schleuderspuren frei Hand gezeichnet oder vermessen wurden. [6, Seite 29-30]

Im folgenden Absatz sollen alle Hilfsmittel genannt werden, die zur Beweissicherung herangezogen werden können. Geräte, wie 3D-Laserscannern und andere, die sehr selten benötigt werden und oft zu teuer sind, werden hier bei der Standardausrüstung nicht mit ausgeführt. Bei einer kriminalistischen Spurensicherung ist es sinnvoller die Ausrüstung der jeweiligen Experten zu verwenden. Anlage 2 zeigt die Geräte, die zur Sicherung von objektiven Merkmalen an der Unfallstelle eingesetzt werden können. [6, Seite 35-36]

2.3 Fotografische Dokumentation

Die wichtigsten Mittel zur Beweissicherung sind Fotografie und Unfallstellenvermessung. Unmittelbar nach dem Eintreffen an der Unfallstelle sollten diese erstellt werden; je komplizierter der Unfall, desto mehr Fotos sind erforderlich. Fotografiert wird bestenfalls nach folgendem Schema:

1. Fotografieren der Spuren und Endlagen entgegen den jeweiligen Fahrrichtungen und aus verschiedenen Abständen. Dabei sollen auch der der Horizont sowie Objekte am Fahrbahnrand (z.B. Verkehrszeichen, Leitpfosten, Häuser) sichtbar sein.
2. Fotografieren der Fahrzeugendlagen quer zum Straßenverlauf. Bremsspuren, Vorderräder, abgefallene Fahrzeugteile und der Straßenrand sollen zu erkennen sein.
3. Fotografieren der Beschädigungen an den Fahrzeugen von vorn und hinten, senkrecht und von der Seite unter einem schrägen Winkel. Es sollen zudem Beschädigungen fotografiert werden, die scheinbar nicht zu dem Unfall gehören.
4. Fotografieren der Spuren. Spuren, die sich unter den Fahrzeugen befinden können gegebenenfalls dokumentiert werden, nachdem die Fahrzeuge aus der Endlage entfernt wurden.

Es kann mit jedem funktionsfähigen Gerät fotografiert werden, da jedes fotografische Material besser ist als keine Bilddokumentation. Für die technische Beweissicherung sollte besonders bei schlechten Licht- und Witterungsverhältnissen eine qualitativ hochwertige Fotoausrüstung verwendet werden, bestenfalls eine digitale Spiegelreflexkamera mit einer hohen Auflösung. Der Einsatz eines Blitzgerätes ist sinnvoll, oftmals auch bei Tageslicht. Der Fahrzeuginnenraum muss ebenfalls fotografiert werden, wenn Kontaktstellen von Insassen im Interieur vorhanden sind. Allgemein ist es sinnvoll, durch eine allgemeine Übersichtsaufnahme, ein Gesamtschaubild auf die Unfallstelle zu zeigen. Besonders Panoramabilder, auch durch Zusammenfügen von Einzelbildern erzeugen eine ähnliche Darstellung wie das menschliche Auge das Gesamtschaubild wahrnimmt. [6, Seite 30-32]



Bild 2: Panoramaaufnahme Verkehrsunfall [7]

2.4 Vermessen von Unfallstelle und Spurenlage

Eine maßstabsgetreue Abbildung der Unfallstelle ist für die Unfallrekonstruktion sehr wichtig. Darin sollten alle objektiven Merkmale der Unfallstelle enthalten sein. Die Geräte für die Vermessung sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 1: Geräte und Verfahren zur Vermessung von Unfallstellen [6, Seite 36]

Standartausstattung	Spezialausstattung
Maßband	Messkamera (3D-Photogrammetrie)
Messrad	Total-Station
Laser-Entfernungsmesser	3D-Laserscanner
2D-Photogrammetrieausstattung	

In den Kapiteln 2.4.1 bis 2.4.5 werden verschiedene Messverfahren von Unfallstellen erläutert.

2.4.1 Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren

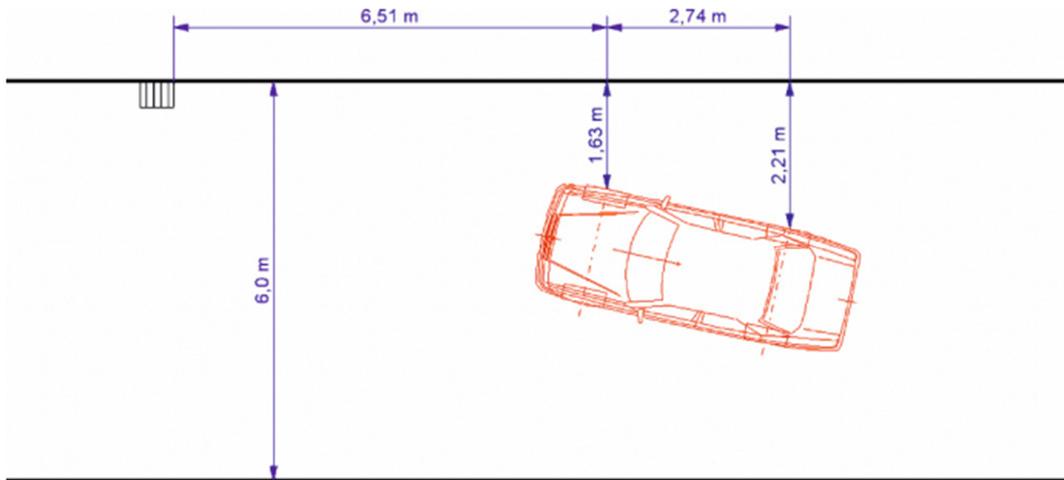


Bild 3: Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren [6]

Das Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren sollte möglichst nur dort verwendet werden, wo eine gerade Kante als Bezug gegeben ist. Dies kann beispielsweise ein gerader Bordstein oder eine gerade verlaufende Fahrbahnmarkierung sein. Es ist wichtig, dass zwischen der Bezugslinie (Grundlinie) und der Messlinie annähernd ein rechter Winkel gegeben ist. Aus Gründen der Genauigkeit ist das Messen der Radaufstandspunkte außen am Fahrzeug den Fahrzeugecken vorzuziehen. [6, Seite 36-37]

2.4.2 Dreieck-Messverfahren

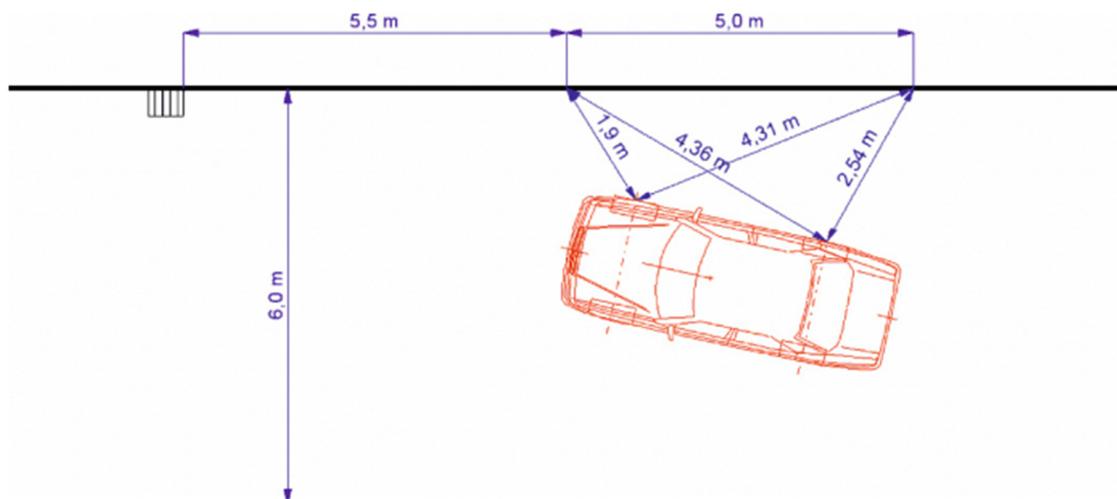


Bild 4: Dreieck-Messverfahren [6]

Wie beim Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren gibt es eine Grundlinie. Ausgehend von dieser wird beim Dreieck-Messverfahren ein Punkt durch zwei Strecken definiert, wodurch ein Dreieck entsteht. Es können beliebig viele Dreiecke angehängt werden. Das Ergebnis der Vermessung hängt im Wesentlichen von der Anzahl der Punkte ab. Wenn diese sinnvoll gewählt sind, können Fahrbahnrandmarkierungen und Spuren detailliert vermessen werden. [6, Seite 37]

2.4.3 Vermessung von Kurven und Bögen

Beim Vermessen von Kurven gibt es zwei Methoden, die in der Praxis angewendet werden, das Dreieck-Messverfahren (Bild 5) und das Sehnen-Höhen-Messverfahren (Bild 6).

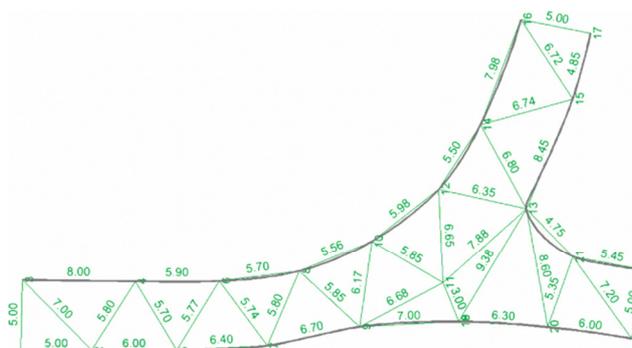


Bild 5: Dreieck-Messverfahren von Kurven [6]

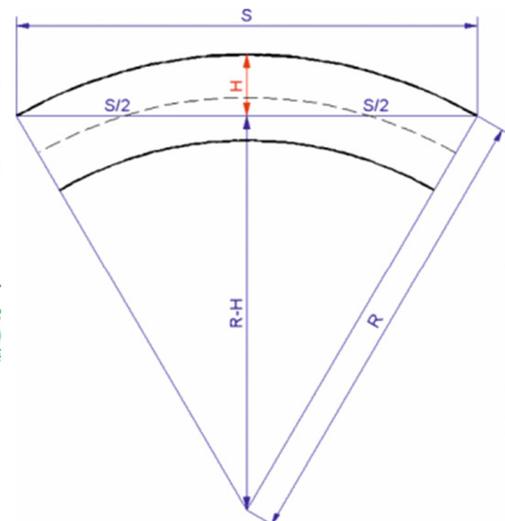


Bild 6: Sehnen-Höhen-Messverfahren von Kurven [6]

Beim Sehnen-Höhen-Messverfahren kann der Kurvenradius näherungsweise mit einem Hilfsmittel, wie beispielsweise einem Maßband bestimmt werden. Wie in Bild 6 dargestellt, wird die Sehne eines Kreisbogens und die Höhe des Bogens in der Sehnenmitte gemessen. Der Radius wird mit folgenden Formeln berechnet:

$$R^2 = (R - H)^2 + \left(\frac{S}{2}\right)^2 \quad (1)$$

Nach der entsprechenden Umformung ergibt sich:

$$R = \frac{S^2}{8 \times H} + \frac{H}{2} \quad (2)$$

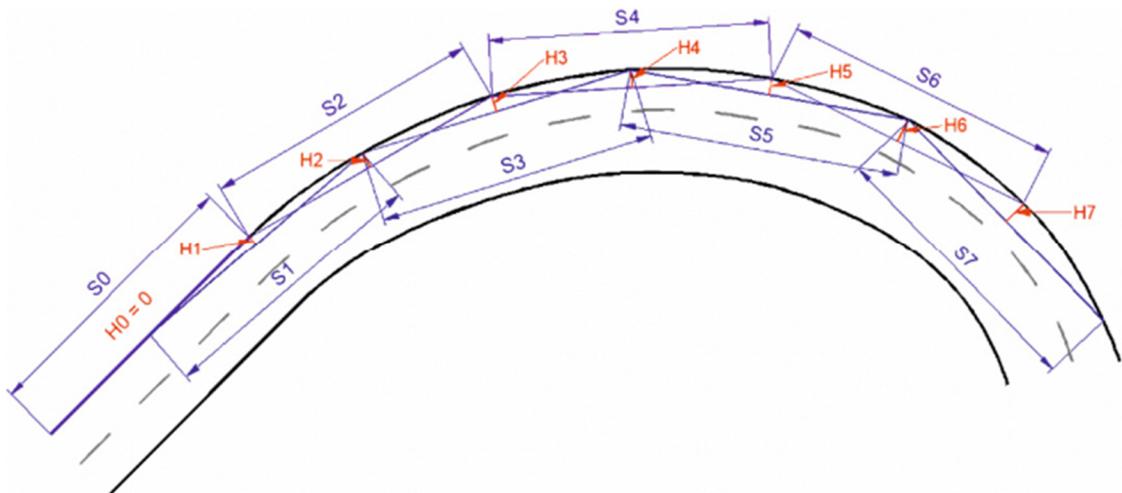


Bild 7: Sehn-Höhen-Messverfahren [6]

Wenn Kurven veränderliche Radien aufweisen, kann das Verfahren wie in Bild 7 mehrfach angewandt werden. Zur Fehlervermeidung ist die erste Sehne auf der Geraden vor der Kurve anzutragen ($H=0$). In der Mitte der Sehnen wird jeweils die nächste Sehne angetragen und die dazugehörigen Höhen gemessen. An den Anfangspunkten der Sehnen werden die Anstände zum Fahrbahnrand und der Fahrbahnmittellinie gemessen. [6, Seite 38-39]

2.4.4 Messtischverfahren

Beim Messtischverfahren wird an einer beliebigen Stelle auf der Fahrbahn ein Messtisch mit einem befestigten Maßband aufgestellt. Am Ende des ausgerollten Maßbandes wird eine Messlatte errichtet. Eine Person, die sich am Messtisch befindet, peilt über ein Lineal die Messlatte an und trägt die Entfernung zur Messlatte auf einem Papier im gewählten Maßstab ein. Durch Eintragen der einzelnen Punkte entsteht eine Darstellung der Unfallsituation. Die Unfallskizze entsteht durch Verbindung der skizzierten Punkte. Es gibt außerdem ein ähnliches Verfahren, wo ein elektronisches Abstandsmessgerät das Maßband ersetzt. Durch dieses Verfahren lassen sich bei sorgfältiger Vermessung sehr genaue Unfallskizzen erstellen. [6, Seite 39]

2.4.5 Totalstation



Bild 8: Tachymeter [18]

Totalstationen (auch Tachymeter genannt) werden in der Unfallrekonstruktion, aber auch in der Architektur und Landvermessung, verwendet. Der Aufwand bis zur Erzeugung einer 3D-Skizze ist sehr hoch, weswegen die Verbreitung des Verfahrens noch gering ist. Die gewonnenen Daten können in

CAD-Programme oder Simulationssoftwares importiert werden. [6, Seite 39-40]

2.4.6 Laserscanning

Laserscanner gehören zwar nicht zur Standardausrichtung bei der Unfallvermessung, werden jedoch in seltenen Fällen aufgrund ihrer hohen Genauigkeit benötigt. Der Grund für den seltenen Einsatz bei diesen Geräten liegt in der Unwirtschaftlichkeit, da Laserscanner (noch) sehr teuer sind. Diese werden meist erst bei der kriminalistischen Spurensicherung angefordert. Das Verfahren des Laserscannings und deren Anwendung in der Verkehrsunfallrekonstruktion sind mit Beispielen in Kapitel vier genauer beschrieben. [6, Seite 36]

2.4.7 3D-Photogrammetrie

Die Photogrammetrie (genauer beschrieben in Kapitel drei) ist sowohl in der Kriminologie als auch bei der Verkehrsunfallrekonstruktion von Bedeutung. In der Unfallrekonstruktion wird die Photogrammetrie unterteilt zum einen in Verfahren zur Auswertung von Fotografien, welche nicht nach den Gesetzen photogrammetrischer Messverfahren erstellt wurden und zum anderen in Messverfahren, welche die Vermessungsarbeiten an der Unfallstelle teilweise oder sogar ganz ersetzen können. Meist werden handelsübliche Kameras zum Erstellen der Fotos verwendet, weil diese in der Anschaffung im Vergleich zu Messkamern wenig kosten und dabei in der Handhabung unkompliziert sind. Beispiele für die

Anwendung der Photogrammetrie in der Verkehrsunfallrekonstruktion werden in Kapitel 3.5 beschrieben. [6, Seite 40-41]

2.5 Sicht des Fahrers

Die Sicht des Fahrzeugführers wird nach dem Unfall mithilfe von Innenraumaufnahmen dokumentiert. Die geometrische Position der Augen des Fahrers im Fahrzeug wird oft als Augpunkt beschrieben. Damit werden die Sichtverhältnisse des Fahrers vor und während des Unfalls skizziert. Dies ist insbesondere wichtig, wenn die Frontscheibe verkratzt oder vereist ist und somit die Sicht auf die Fahrbahn bedeutend eingeschränkt wird. Dadurch wird außerdem sichtbar, ob beim Unfall das Hindernis beispielsweise durch die A-Säule, verdeckt wird. Ebenfalls kann durch diese Aufnahmen der tote Winkel des Fahrers festgestellt werden. Mitunter sind Informationen über die Pedalstellung, Sitzeinstellungen, Kontaktstellen von Insassen an Interieurteilen wichtig für die Aufarbeitung des Unfallgeschehens. [8, Seite 12]

2.6 Unfallrekonstruktion und Gutachtenerstellung

Die Polizei prüft nach dem Unfall immer, ob sich Beteiligte strafbar gemacht haben. Aber auch bei der Durchsetzung zivilrechtlicher Ansprüche der Unfallbeteiligten können die Daten der Unfallaufnahme verwendet werden. Ein Sachverständiger kann dann mit der Rekonstruktion des Unfalls beauftragt werden, wenn der Unfallhergang für Richter, Staatsanwalt oder Schadenregulierer bei der Versicherung nicht ausreichend gut zu beurteilen ist. Dieses zu erstellende Gutachten dient als bedeutende Grundlage für Gerichtsverfahren und Schadenregulierung und hat somit unmittelbar Einfluss auf die Rechtssicherheit. Die objektiven Merkmale für das Gutachten des Sachverständigen wird meist direkt am Unfallort erhoben. Zeugenaussagen etc. können auch später in die Begutachtung aufgenommen und ausgewertet werden. [6, Seite 27]

Grundlagen der Unfallaufnahme und Unfallrekonstruktion

Eine gute Tatbestandsaufnahme ist wichtig, damit der Unfallsachverständige die Geschwindigkeiten und den Unfallablauf besser berechnen kann. Die in Tabelle 1 aufgelisteten Daten dienen hierzu als Grundlage. Der Sachverständige muss festhalten, auf welchen Akten sein Gutachten basiert, wie bei jedem anderen forensischen Gutachten. Um den Unfallablauf für das Gericht und die Strafuntersuchungsbehörde gut zu visualisieren, wird der Unfallhergang mit bekannten Softwares, zum Beispiel PC-Crash, simuliert. Dabei sind die Eingabedaten zur Überprüfbarkeit der Berechnungsgrundlagen offen zu legen. Weil die diesen Computerprogrammen zugrundeliegende Mathematik nicht im Detail offengelegt ist, sind solche Animationen für ein forensisches Gutachten oft unzureichend. Die Verteidigung reicht oft Gegengutachten ein, weil oft ein subjektives Unsicherheitsgefühl vorherrscht. Um das forensische Gutachten möglichst nachvollziehbar zu gestalten, sind die einzelnen Phasen des Unfallablaufs nach physikalischen Gesetzen zu erklären. Die dabei verwendeten Formeln zur Berechnung müssen offengelegt werden, um das Ergebnis des Gutachtens mit der Gegenpartei kritisch diskutieren zu können. Bei Einwendungen muss die Gegenseite konkret vorbringen, was am Gutachten nicht richtig sein soll, meistens ist dies eine Anzweiflung des Haftreibungskoeffizienten der Reifen. Daraufhin bezieht der Gutachtenersteller Stellung zu den gemachten Einwendungen und die Staatsanwaltschaft entscheidet, ob eine weitere technische Untersuchung desselben Gutachters veranlasst werden soll. Mitunter wird auch ein Obergutachten in Auftrag gegeben. Wenn der Sachverständige nur mit dem Spurenbild den Unfallablauf mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit rekonstruieren kann, ist die Beweislage optimal. Das Gericht weicht kaum in seinem Urteil von den Schlussfolgerungen des Gutachtens ab, wenn sehr qualifizierte Gutachter eingesetzt werden. [6, Seite 23-24]

3 Photogrammetrie

3.1 Geschichtliche Entwicklung



Am 19. August 1839 erfindet der Physiker Dominique Francois Arago (1786-1853) die Photographie und weist dabei direkt auf die Möglichkeiten zur Ausmessung photographischer Bilder hin. Praktische Versuche hierzu gibt es jedoch erst circa 20 Jahre später durch den Oberst Aimé Laussedat (1819-1907), als er 1852 versucht, photographische Bilder für topografische Aufgaben einzusetzen. Eine geeignete Kamera entwickelt er bis ins Jahr 1859. Der deutsche Baumeister Albrecht Meydenbauer (siehe Bild 9) beginnt 1858

Bild 9: Albrecht Maydenbauer [12]

damit, bislang aufwändige Bauaufnahmen mithilfe von Fotografien durchzuführen. Für die Anerkennung dieses Messbild-Verfahrens setzt er sich Jahrzehnte lang ein, mit dem Ziel, ein „Denkmälerarchiv“ zu schaffen, in dem wichtige Baudenkmäler in Messbildern zu finden sein sollen. Durch sein Engagement wird schließlich 1885 in Berlin die „Königlich Preußische Meßbildanstalt“ gegründet.



Bild 10: Signet der
Königlichen
Messbildanstalt Berlin [12]

Diese Messbildanstalt (siehe Bild 10) gilt als die erste photogrammetrische Institution weltweit. Anfangs gibt es für photogrammetrische Aufzeichnungen noch keinen einheitlichen Namen. Aus dem anfänglich von Albrecht Meydenbauer eingeführten Begriff „Photometrographie“ im Jahr 1867 entwickelt sich der Ausdruck „Photogrammetrie“. Dieser ist der Titel einer von ihm entwickelten Zeitschrift vom 6. Dezember 1867. Der Begriff wird daraufhin unangefochten zum weltweit akzeptierten und benutzten Begriff. [12, Seite 3-6]

Photogrammetrie

Anschließend bis circa 1900 wird das photogrammetrische Verfahren erprobt und weiterentwickelt, unter anderem 1873 durch Jordan (Oase von Dachel), 1884 durch Pagani (Alpenkartierung) und Finsterwald (analytische Lösungen, siehe Bild 11). In dieser Zeit wird die Photogrammetrie neben der Bauaufnahme insbesondere für topographische Anwendungen genutzt, vor allem wenn Objektbereiche schwer zugänglich sind. [10, Seite 40]

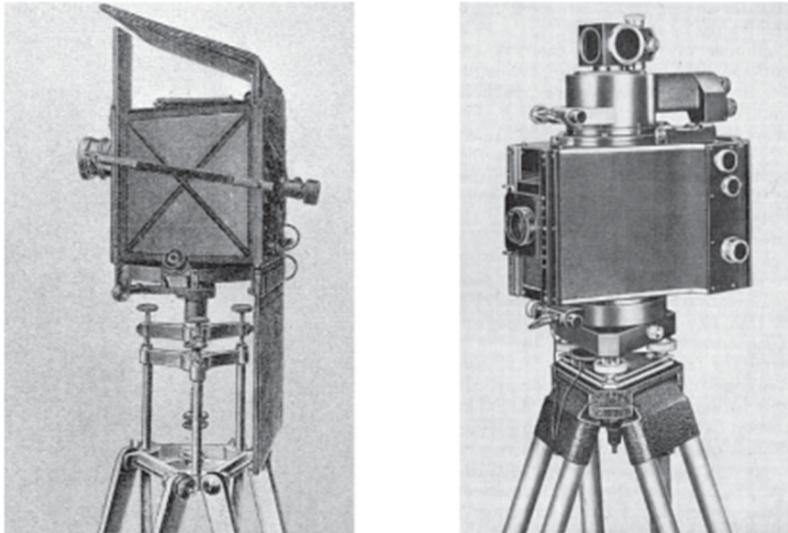


Bild 11: Bildmesstheodolite von Finsterwald (1895) und Zeiss Jena (ca.1904) [10]

Um 1900 gibt es erste Konstruktionen stereoskopischer Auswertegeräte, mit denen erstmals Bildkoordinaten unter stereoskopischer Betrachtung gemessen werden können. Dadurch steigt die Qualität in der Zuordnung identischer Bildpunkte enorm. Vorreiter war hier vor allem Pulfrich (1901, Zeiss Jena), der den ersten Stereokomparator baut (siehe Bild 12).

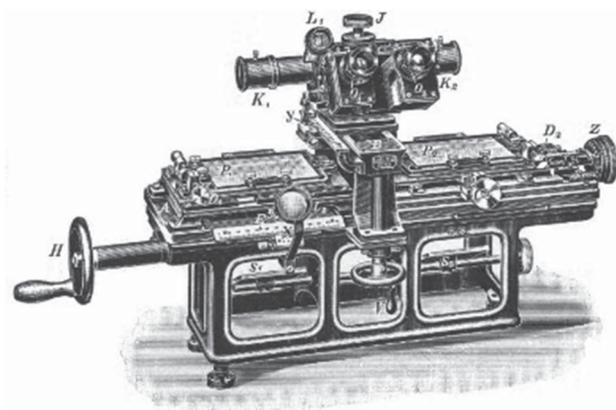


Bild 12: Stereokomparator nach Pulfrich (Zeiss, ab 1901) [10]

Photogrammetrie

Orel-Zeiss entwickelt von 1909 bis 1911 den Stereoautograph, mit dem es möglich ist, kontinuierliche Höhenschichtlinien zu erfassen. Dieses stereoskopische Auswertegerät wird auch für topographische Nachbereichsanwendungen genutzt.

Die Entwicklung der photogrammetrischen Stereoauswertungsgeräte wird zwischen den Weltkriegen weiter vorangetrieben. In dieser Zeit werden vor allem Geräte, die zur Luftbildauswertung genutzt werden, entwickelt. Außerdem entstehen Geräte zur Bildentzerrung, mit denen Bildkarten hergestellt werden können.

Bis ungefähr 1980 kommen vor allem sogenannte Messkammern für die Aufnahme der Nahbereichsphotogrammetrie zum Einsatz. Als Emulsionsträger werden zunächst ausschließlich Glasplatten verwendet, damit eine ebene Bildfläche ohne großen mechanischen Aufwand realisiert werden kann. Film kommt erst seit den fünfziger Jahren als Emulsionsträger zum Einsatz. Solche Messkammern sind auf den Bildern 13 und 14 zu sehen. [10, Seite 40-42]



Bild 13: Messkammer Zeiss TMK 6 (links) [10]



Bild 14: Stereomesskammern Zeiss SMK 40 und SMK 120 (rechts) [10]

Die analytische Photogrammetrie beginnt in den fünfziger Jahren mit dem Aufkommen elektronischer Rechner. Es werden Mono- und Stereokomparatoren zur hochgenauen Messung von Bildkoordinaten entwickelt. Außerdem entstehen analytische Stereoauswertegeräte (Analytische Plotter), die aufgrund ihrer

Photogrammetrie

universellen Einsetzmöglichkeiten in der Nahbereichsphotogrammetrie verwendet werden. (Bild 15)



Bild 15: Analytischer Stereoplotter Zeiss Planicomp (ca. 1980) [10]

Mit Beginn der sechziger Jahre werden zunehmend Modell- und Bündelausgleichungsprogramme entwickelt. Für die besonderen Anforderungen an die Orientierung werden ab den achtziger Jahren Bündelausgleichungsprogramme eingesetzt. Dadurch wird die Aufnahme beliebig angeordneter Bildverbände und die simultane Berechnung der Kalibrierungsdaten (innere Orientierung) der Aufnahmekameras ermöglicht. Die bis dahin genutzten Messkammern (bekannte und konstante innere Orientierung) werden von nun an durch modifizierte professionelle Fotokameras eingesetzt. Durch den Einbau von Réseaus Glassplitterplatte werden diese für photogrammetrische Anwendungen nutzbar (siehe Bild 16). Dadurch wird die Anwendbarkeit der Photogrammetrie deutlich erhöht. [10, Seite 42-43]



Bild 16: Teilmesskamera Rolleiflex SLX (ca. 1980) [10]

Photogrammetrie

Optoelektronische Bildsensoren kommen ab Mitte der 1980er Jahre zum Einsatz. Durch die fortgeschrittene Rechnertechnologie ist es möglich, digitale Bilder zu verarbeiten. Bildpunkte werden automatisch erkannt und gemessen (Digitale Photogrammetrie).

Mit Standard-Videokameras werden erste volldigitale photogrammetrische Aufnahmen gemacht, deren analoge Bildsignale in Echtzeit mit einer Auflösung von 780 x 580 Pixeln digitalisiert und ausgewertet werden können (Videogrammetrie). In Bild 17 ist eines der ersten Online-Mehrbildsysteme von Haggrén aus 1987 zu sehen. Für die Karosserievermessung im Automobilbau werden vor allem Korrelatorsysteme (siehe Bild 18) verwendet, bei denen analytische Plotter mit Videokameras erweitert werden. [10, Seite 44]



Bild 17: Online-Mehrbildsystem Mapvision [10]

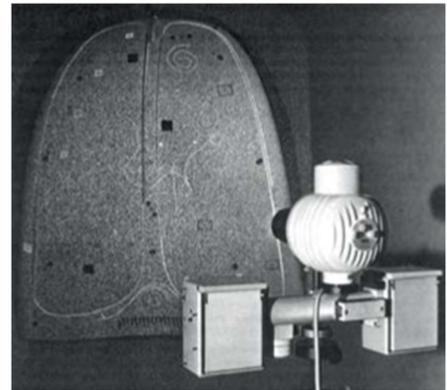


Bild 18: Zeiss Indusurf (1987)
[10]

Da Videokameras eher kleine Bildformate und geringe Auflösungen aufweisen, werden die ersten Scanning-Kameras entwickelt, die statische Objekte hochauflösend (bis zu ca. 600 x 4500 Pixel) erfassen können.

In den neunziger Jahren werden Digitalkameras mit höheren Auflösungen entwickelt, die direkt ein digitales Bild ohne analoge Signalverarbeitung liefern. Hochauflösende Bilder können direkt in der Kamera (z.B. Kodak DCS 460, Bild 19) gespeichert werden. Dadurch wird die photogrammetrische Messtechnik besonders im industriellen Umfeld deutlich erweitert. Zu den bisher bekannten „Offline-Photogrammetriesystemen“ entwickeln sich „Online-Photogrammetriesysteme“ (Bild 20). Diese gibt es sowohl in stationären Messanlagen, aber auch in mobilen Aufnahmegeräten. Die vollautomatische Identifizierung und Zuordnung von

Photogrammetrie

Objektpunkten und die Orientierung erfolgt durch Codierte Punktmarken. [10, Seite 45-46]



Bild 19: Videokamera Kodak DCS 460 (links) [10]

Bild 20: Online-Industriemesssystem GSI V-STARS (rechts) [10]

An größerer Bedeutung haben seitdem grafisch- interaktive Mehrbildauswertesysteme gewonnen. Diese erlauben eine Auswertung digitaler Bildverbände in einer CAD-Umgebung. Es entstehen einfach bedienbare und kostengünstige Softwarepakete, wie beispielsweise EOS PhotoModeler, die eine Objektrekonstruktion und die Erstellung von virtuellen 3D-Modellen, ohne große Kenntnisse der Photogrammetrie, erlauben. Seit etwa 2010 kommen vermehrt Softwarelösungen zum Einsatz, die weitgehend beliebige Bildverbände vollautomatisch orientieren und kalibrieren. Dabei werden dichte Punktwolken und True-Orthophotos erstellt. Agisoft Metashape oder RealityCapture sind Beispiele für solche Programme. [10, Seite 39-46; 12]

3.2 Anwendungsbereiche der Photogrammetrie

Photogrammetrie kann in zwei große Hauptanwendungsgebiete unterteilt werden, nämlich in Luftbild-Photogrammetrie und Nahbereichs-Photogrammetrie.

Bei der Luftbild-Photogrammetrie werden mithilfe von Drohnen oder aus Flugzeugen oder Helikoptern heraus Luftbilder erstellt. Vor allem in Gebieten, wo Flugzeuge schwer einzusetzen sind, werden häufig Drohnen zum Fotografieren verwendet. Dabei überlappen sich die aufgenommenen Bilder meistens, es entstehen streifenweise angeordnete Bildverbände. Diese werden in ein gemeinsames Koordinatensystem gefügt. Anhand von Pass- und Verknüpfungspunkten im Rahmen einer Bündelblockausgleichung (siehe Kapitel 3.4) erfolgt die Orientierung der Bildverläufe. Daraus entstehen 3D-Punkte, digitale Geländemodelle (DGM), Orthophotos, etc.

Diese Ergebnisse werden häufig zur Erstellung und Fortführung von topografischen Karten mit großmaßstäblicher Punktbestimmung verwendet. [6, Seite 41; 7]

Bei der Nahbereichs-Photogrammetrie werden Objekte mit einer Größe von wenigen Zentimetern bis zu rund 100 Metern fotografiert. Dabei gibt es, im Gegensatz zur Luftbild-Photogrammetrie, keine Einschränkungen bei der Aufnahmeanordnung. Meist wird ein Objekt mit einer Handkamera aus mehreren zufälligen Richtungen fotografiert.

Am häufigsten wird die Nahbereichs-Photogrammetrie in der industriellen Messtechnik, Medizin, Biomechanik und Unfallaufnahme eingesetzt. Aber auch in der Archäologie und Architektur wird dieses Verfahren angewandt. Hier wird die Bauaufnahme von denkmalgeschützten Objekten, beispielsweise bei Umbauten, mithilfe von Nahbereichs-Photogrammetrie dokumentiert. [2, Seite 41]

Im Folgenden werden die wichtigsten Anwendungsbereiche der Nahbereichs-Photogrammetrie aufgelistet und Beispiele genannt:

- Automobil-, Maschinen- und Schiffbau:
 - Überprüfung von Fertigungsvorrichtungen
 - Erfassen von Design-Modellen

Photogrammetrie

- Fertigungsmesstechnik
- Form- und Maßkontrolle
- Aufnahme von Crash-Versuchen
- Fahrerassistenzsysteme und autonome Fahrzeuge
- Roboterkalibrierung- und Steuerung
- Vermessung von Schiffssektionen
- Form- und Maßkontrolle an Schiffsteilen
- Luft- und Raumfahrtindustrie:
 - Vermessung von Parabolantennen und Parabolspiegeln
 - Montageüberwachung
 - Ausrichtung und Überprüfung von Vorrichtungen
 - Weltraumsimulation
- Architektur, Denkmalpflege, Archäologie:
 - Fassadenaufmaße
 - Baugeschichtliche Dokumentationen
 - Deformationsmessungen
 - Rekonstruktion zerstörter Gebäude
 - Kartierung von Ausgrabungsstätten
 - Monumente und Skulpturen
 - 3D-Modelle und Texturierung
- Ingenieurbau:
 - As-Built-Erfassung von Industrieanlagen
 - Erfassung von Großbauwerken
 - Deformationsmessungen
 - Rohrleitungs- und Tunnelaufnahmen
 - Bergbau
 - Beweissicherungsmaßnahmen
 - Baustellen-Monitoring
 - Straßen- und Schienenvermessung
 - Windkraftanlagen
- Medizin und Physiologie:
 - Zahnvermessungen

Photogrammetrie

- Wirbelsäulendeformationen
- Plastische Chirurgie
- Neurochirurgie
- Endoskopie
- Bewegungsstudien und Ergonomie
- Mikroskopische Auswertungen
- Bildgestützte Operationen (Navigation)
- Unfallaufnahme und Forensik:
 - Dokumentation von Verkehrsunfällen
 - Tatort- und Tätervermessung
 - Beweissicherung
 - Tatrekonstruktion
- Animation und Filmindustrie:
 - Aufnahme von Körpermodellen
 - Bewegungsanalysen
 - 3D-Filme
 - Virtuelle Welten (Virtual Reality)
 - Augmented Reality
- Informationssysteme:
 - Gebäudeinformationssysteme
 - Building Information Modeling (BIM)
 - Facility Management
 - Produktionsplanung
 - Bilddatenbanken
 - Internetportale (digitale Globen)
- Naturwissenschaften:
 - Strömungsmesstechnik
 - Wellentopografie
 - Wachstum von Kristallen
 - Pflanzenwachstum
 - Materialwissenschaften
 - Geowissenschaften

Photogrammetrie

- Gletscher- und Hangvermessungen
- Usw.

[10, Seite 36-38]

3.3 Definition und Prozess der Photogrammetrie



Bild 21: Photogrammetrische Abbildung [11]

Mithilfe der Photogrammetrie rekonstruiert man die Form und Lage von Objekten aus einem oder mehreren Bildern, die photochemisch, photoelektrisch oder durch Laserscanaufnahmen entstanden sind. [9, Seite 1]

„Photogrammetrie ist ein Verfahren, um aus Fotos 3D Modelle zu erstellen. Hierbei werden 2D- und 3D-Daten aus Fotos extrahiert. Bei diesem Prozess werden überlappende Fotos eines Objekts, Raums, Gebäudes oder Geländes in digitale 2D-Zeichnungen oder 3D-Modelle umgewandelt.“ [11]

In allen Bereichen, in denen Messobjekte fotografisch abgebildet oder ausgewertet werden können, können photogrammetrische Methoden angewendet werden. Die exakte dreidimensionale geometrische Rekonstruktion des Objektes bildet das primäre Ziel des photogrammetrischen Verfahrens. Dabei wird das Objekt in grafischer, beispielsweise in Plänen, Bildern, Karten, oder digitaler Form, wie Koordinaten und abgeleitete geometrische Elemente modelliert.

Photogrammetrie

In der Verkehrsunfallrekonstruktion ist die Photogrammetrie von hoher Bedeutung. Sie wird unterteilt in Messverfahren, die an der Unfallstelle herkömmliche Vermessungsarbeiten ganz oder teilweise ersetzen können und zum anderen in Verfahren zur Auswertung beliebiger Fotografien, die ursprünglich nicht für photogrammetrische Messverfahren eingesetzt werden sollten.

Bei der Umsetzung eines dreidimensionalen Objektes in ein zweidimensionales Bild kommt es immer in vielfältiger Hinsicht zu Informationsverlusten. Verdeckte Bereiche, wie beispielsweise die Rückseite eines Gegenstands, können aus diesem einen Bild nicht rekonstruiert werden. Auch Stellen, die aufgrund zu geringer Größe oder mangelndem Kontrast auf dem Bild nicht mehr sichtbar sind, können nicht dargestellt werden. Es kommt zudem zu Abbildungsfehlern durch geometrische Veränderungen des dreidimensionalen Objekts und die räumliche Anordnung von Kamera und Gegenstand. Durch Eigenschaften des lichtempfindlichen Sensors der Kamera und der vorhandenen Medien, zum Beispiel Luft oder Glas, wird die vom Objekt reflektierten elektronmagnetischen Strahlungen beeinflusst. Dies wird radiometrische oder farbliche Veränderung genannt. [6,9,10,11]

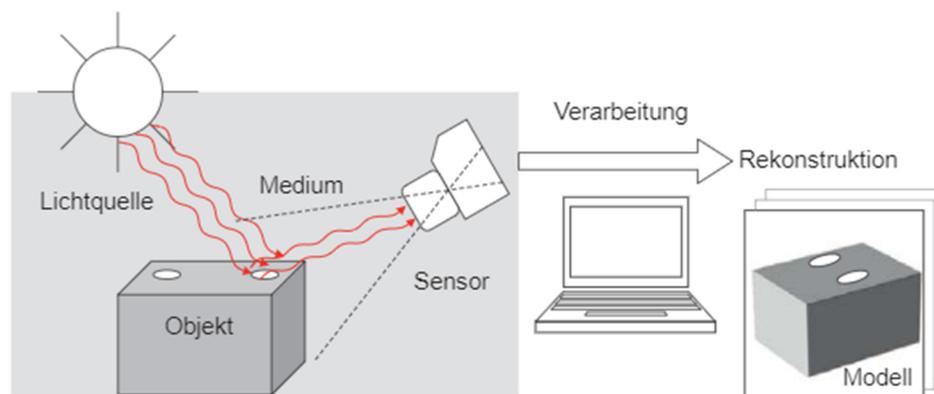


Bild 22: Vom Objekt zum Ergebnis [10]

Zunächst ist es notwendig, den optischen oder physikalischen Entstehungsprozess einer Bildaufnahme zu beschreiben. Die zu diesem Prozess benötigten Komponenten sind Lichtquelle, Merkmale der Objektoberfläche und Medium, Sensor- und Kameratechnik, Bildverarbeitung und anschließende Objektrekonstruktion (siehe Bild 22).

Photogrammetrie

Um einen abgebildeten Objektpunkt aus der Helligkeits- und Farbverteilung im Bild zu identifizieren, werden Methoden für die Bildmessung und Bildinterpretation benötigt. Mithilfe von geometrischen Informationen (Lage im Bild) und radiometrischen Informationen, dazu gehören Grauwert, Intensität und Farbwert, können dann Messwerte zu jedem Bildpunkt gewonnen werden. Damit dies gelingt, benötigt man Bildmesssysteme mit ausreichender optischer und geometrischer Qualität.

Basierend auf mathematischen Modellen, die später genauer erläutert werden, wird eine Transformation zwischen Bild- und Objektraum definiert. Diese beschreibt die Prozesse der Bildmessung und Bildaufnahme. Durch die vorgenommenen Bildmessungen und der daraus abgeleiteten Transformation kann schließlich das Objekt rekonstruiert und modelliert werden (siehe Bild 23).

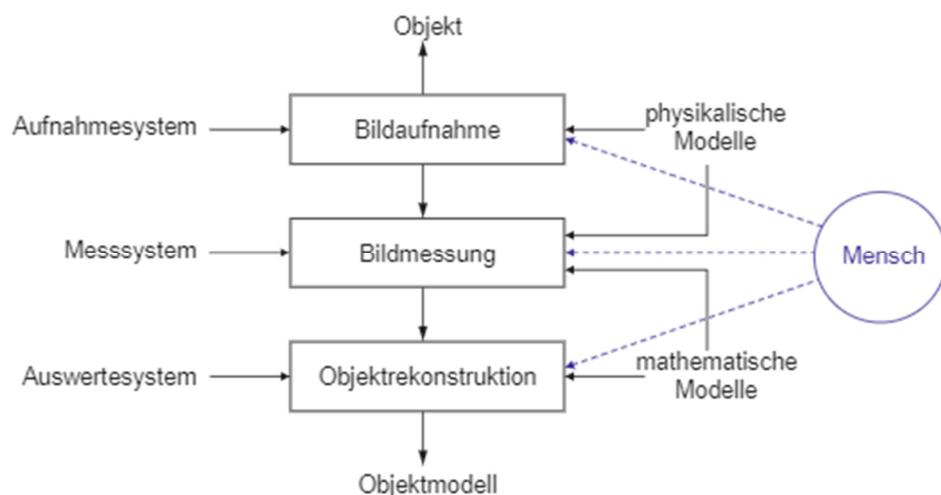


Bild 23: Vom Objekt zum Modell [10]

Die wichtigsten instrumentellen Komponenten werden auf der linken Seite in Bild 23 dargestellt. Die rechte Seite beschreibt die methodischen Eigenschaften dieses Ablaufs. Neben den physikalischen und mathematischen Modellen spielt auch der Mensch mit seiner Erfahrung, seinem Wissen und seinem Handeln eine besondere Rolle. All dies zusammengefasst beschreibt die Qualität des rekonstruierten Modells im Vergleich zum aufgenommenen Objekt. [10, Seite 25-26]

3.4 Mathematische Grundlagen

3.4.1 Kamerakalibrierung und innere Orientierung

Bei der Kamerakalibrierung geht es um die Ermittlung aller relevanten geometrischen Größen, die die Abweichung der realen Abbildung vom idealen zentralprojektiven Modell der Lochkamera beschreibt. Diese werden zusammengefasst Parameter der **inneren Orientierung** genannt. Die Güte der Kamerakalibrierung ist von herausragender Bedeutung und hat einen direkten Einfluss auf die nachfolgenden Prozesse. Dabei wird innerhalb eines Mess- und Rechenprozesses auf Basis bewährter mathematischer und physikalischer Modelle versucht, die inneren geometrischen Kennzeichen so zu bestimmen, dass sie den realen Zustand zum Zeitpunkt der eigentlichen Aufnahme am besten beschreibt. Deswegen ist es notwendig die Kamera mechanisch zu stabilisieren. Es ist immer notwendig ein kamerafestes Bezugssystem zu bestimmen, das eine eindeutige Zuordnung des erstellten Bildes zur Kamera sicherstellt. [13, Seite 118]

Die innere Orientierung kann in zwei Gruppen aufgeteilt werden:

1. Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem

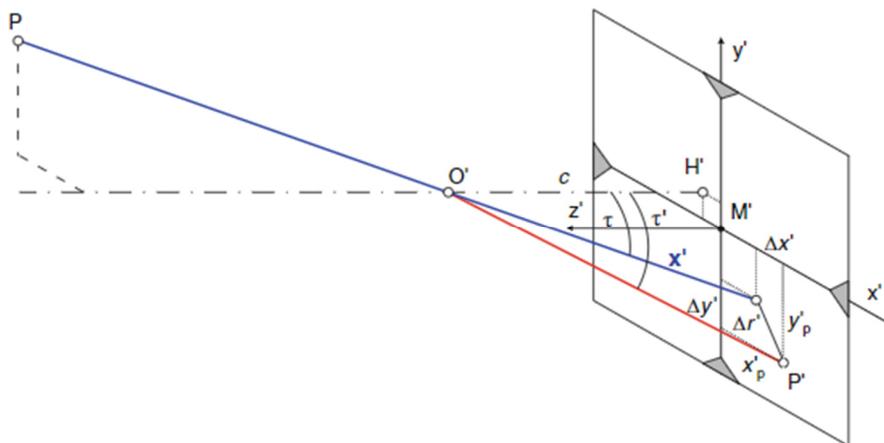


Bild 24: Parameter der inneren Orientierung [13]

Des Projektionszentrum O' ist der kalibrierte bildseitige Punkt, durch den alle Bildstrahlen mathematisch geradlinig verlaufen. Das physikalische Projektionszentrum wird in Bild 24 als Mittelpunkt der bildseitigen optischen Hauptebenen beschrieben und ist mit dem photogrammetrische Projektionszentrum

Photogrammetrie

nur näherungsweise gleich. Die räumliche Lage von O' wird durch folgende Größen festgelegt:

- Kamerakonstante c : Lotrechter Abstand von O' von der Bildebene
- Bildhauptpunkt H' : Bildkoordinaten x'_0, y'_0 des Lotfußpunktes von O'

Für ein positives Bild muss die Kamerakonstante c negativ sein, da O' in negativer z' -Richtung liegt. Der Betrag entspricht bei Fokussierung auf unendlich ungefähr der Objektivbrennweite.

2. Bildfehler beschreibende Funktionen

Der größte geometrische Abbildungsfehler in der Photogrammetrie entsteht durch die Verzeichnung im Objektiv. Das liegt vor allem an wellenlängenabhängiger Brechung einfallender Lichtstrahlen an den optischen Trennflächen im Objektiv. Der Einfluss ist größtenteils radial-symmetrisch zur optischen Achse. Gegenüber der fehlerfreien Abbildung wird jeder Bildpunkt lateral in Richtung zur optischen Achse (Bildhauptpunkt) versetzt. Das Vorzeichen hängt dabei von der Blendenlänge im Objektiv ab (siehe Bild 25). [13]

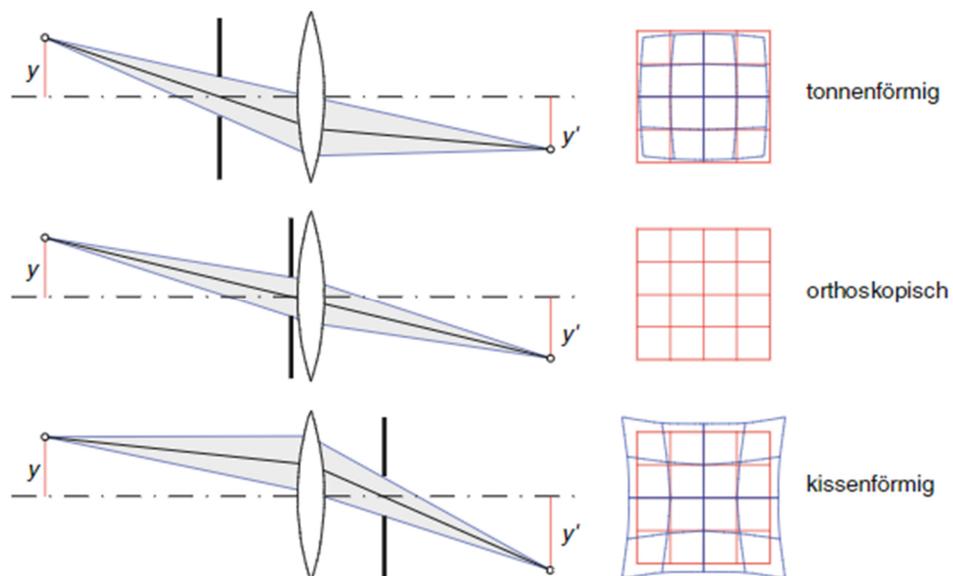
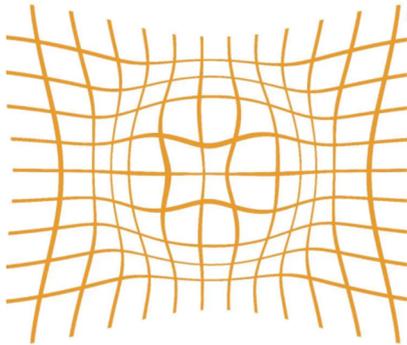


Bild 25: Verzeichnung in Abhängigkeit von der Blendenlage [13]

Zusätzlich gibt es noch die sogenannte Moustache- (Schnurrbart-) Verzeichnung. Dies ist eine Kombination aus der kissenförmigen und tonnenförmigen

Photogrammetrie



Verzeichnung. Gerade Linien des Netzes erscheinen nach innen zur Mitte gekrümmt, um sich an den äußeren Ecken ebenfalls zu krümmen (siehe Bild 26) [14]. Mithilfe des Seidel-Polynoms kann der radiale Versatz in Abhängigkeit vom Abstand r' zur optischen Achse bestimmt werden:

Bild 26: Moustache-Verzeichnung [14]

$$\Delta r'_{rad} = A_1 r' (r'^2 - r_0^2) + A_2 r' (r'^4 - r_0^4) + A_3 r' (r'^6 - r_0^6) \quad (3)$$

Diese kissen- bzw. tonnenförmige Verzeichnung eines realen Bildes wird in Bild 27 dargestellt. [13, Seite 119-122]



Bild 27: Kissen- und tonnenförmige Verzeichnung in einem aufgenommenen Bild [13]

3.4.2 Äußere Orientierung

Bei der äußeren Orientierung wird der Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem hergestellt. Dieser Vorgang ist meist sehr komplex, da Aufnahmen beliebig angeordnet in beliebig definierten Objektkoordinatensystemen vorliegen können. Die Bestimmung erfolgt in der Regel durch Messung bekannter Passpunkte im Bild. Meist werden hierfür Hilfskoordinaten durch Messmarken mit bekannten 3D-Punkten oder Längen genutzt. [13, Seite 134-135]

3.4.3 Bündeltriangulation

Die Bündeltriangulation (auch Bündelblockausgleichung, Mehrbildtriangulation, Mehrbildorientierung genannt) ist ein photogrammetrisches Verfahren zur simultanen rechnerischen Einpassung von beliebig viele, beliebig im Raum angeordneten Bildern (Strahlenbündel). Dabei werden geodätische Beobachtungen, photogrammetrisch gemessene Bildpunkte und ein übergeordnetes Koordinatensystem (siehe Bild 28) berücksichtigt. Mithilfe identischer (korrespondierender) Punkte werden die einzelnen aufgenommenen Bilder zu einem Gesamtmodell verknüpft. Darin kann das Objekt vollständig dreidimensional nachgebildet werden. Durch Passpunkte wird der Bezug zum übergeordneten Koordinatensystem hergestellt, wobei die Zahl klein gehalten werden soll. Größere Räume ohne Passpunkte können durch Mehrbildverbände überbrückt werden. Dabei ist es am wichtigsten, dass sich alle korrespondierenden Bildstrahlen in einem Punkt schneiden (Objektpunkt). [10, Seite 340]

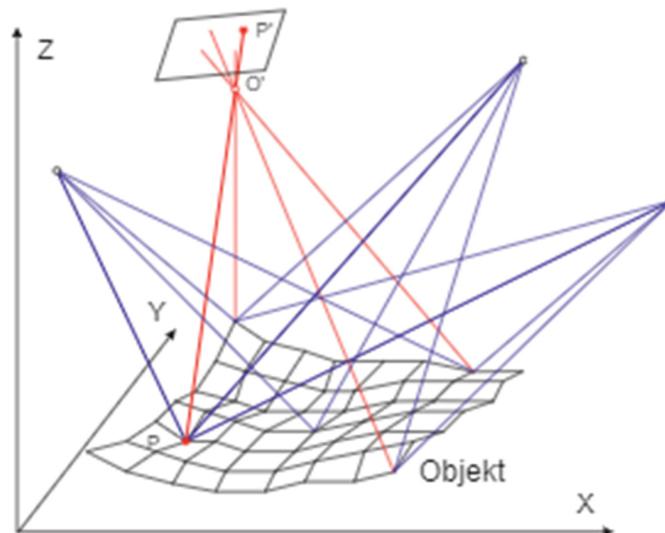


Bild 28: Bündeltriangulation [10]

3D-Objektpunktkoordinaten, Orientierungsparameter der Bilder und weitere Modellparameter werden zusammen mit den dazugehörigen statistischen Angaben zur Zuverlässigkeit und Genauigkeit durch Ausgleichung in einem übereinstimmenden Gleichungssystem berechnet. Im simultanen Berechnungsprogramm werden alle Parameter so optimiert, sodass sich die korrespondierenden Strahlen an den Objektpunkten bestmöglich schneiden. Dadurch

Photogrammetrie

wird, wie in Bild 29 abgebildet, ein dichtes, dreidimensionales und sehr genaues Netz gebildet. Die Bündeltriangulation gilt als das photogrammetrische Verfahren mit der höchsten Genauigkeit. [10, Seite 340-341]

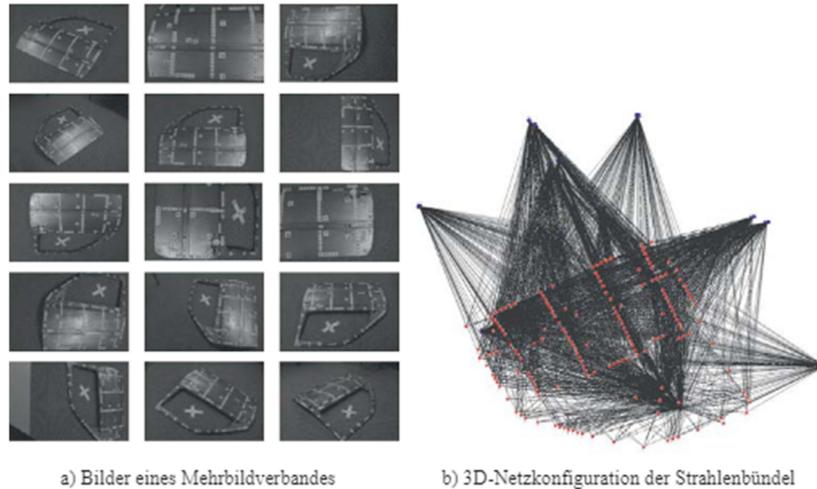


Bild 29: Mehrbildverband zur Vermessung einer Autotür [10]

Das mathematische Verfahren zur Bündeltriangulation sieht wie folgt aus:

$$x' = x'_0 + z' \frac{r_{11}(X-X_0)+r_{21}(Y-Y_0)+r_{31}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} + \Delta x' \quad (4)$$

$$y' = y'_0 + z' \frac{r_{12}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} + \Delta y' \quad (5)$$

mit

x', y' : gemessene Bildkoordinaten

$x'_0, y'_0, z' = -c$ Lage des Projektionszentrums im Bild

$\Delta x', \Delta y'$: Korrekturwerte für Abbildungsfehler

X, Y, Z : Koordinaten des Objektpunktes

r_{ij} : Koeffizienten der Rotationsmatrix

X_0, Y_0, Z_0 : Koordinaten des Projektionszentrums im übergeordneten Koordinatensystem [13, Seite 135]

3.5 Anwendung in der Verkehrsunfallrekonstruktion

3.5.1 2D-Photogrammetrie

Photogrammetrie hat sich als ein wichtiges Verfahren zur Vermessung in der Unfallanalyse und -rekonstruktion etabliert. 2D-Photogrammetrie wird vor allem zur Vermessung von Unfallstellen angewendet. Dabei können Schrägansichten von möglichst ebenen Flächenelementen umgerechnet in Orthogonalansichten, in ein Gesamtbild zusammengefügt werden. Für die Unfallrekonstruktion und entsprechende Gutachten stellen solche maßstabsgetreuen orthogonalen Ansichten eine wichtige Grundlage dar. Auch bei nicht exakt ebenen Flächen liegt das Ergebnis der Entzerrung bei richtiger Anwendung im vertretbaren Toleranzbereich. Mittels der Software PC-Rect des Unternehmens DSD können beispielsweise solche Vermessungen durchgeführt werden. Beispiele werden in den Bildern 30 und 31 veranschaulicht. [19, Seite 1-2]

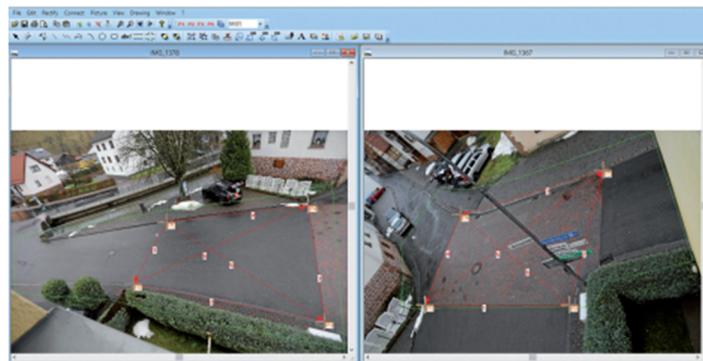


Bild 30: Zweidimensionale photogrammetrische Vermessung einer Unfallstelle [19]

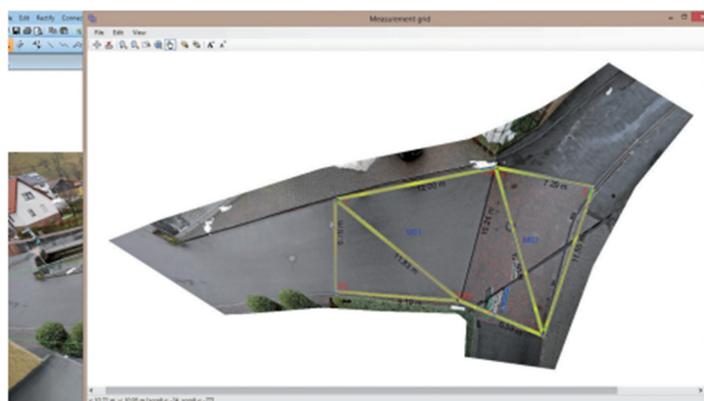


Bild 31: Zweidimensionale verzerrte photogrammetrische Vermessung einer Unfallstelle [19]

3.5.2 3D-Photogrammetrie

Bei stark gekrümmten Flächen wie etwa der Karosserie eines PKWs, kommen Verfahren der 2D-Photogrammetrie schnell an ihre Grenzen. Die bessere Methode zur geometrischen Modellierung von räumlich gekrümmten Oberflächen ist das Arbeiten mit Programmen der 3D-Photogrammetrie. Neben dem klassischen Vermessen von Deformationen von Fahrzeugen nach einem Unfall mit Messlatten oder Bandmaß werden 3D-Laserscanner oder die 3D-Photogrammetrie angewandt. Zum einen ist die Vermessung mittels 3D-Photogrammetrie deutlich genauer, zum anderen ist beim Erstellen die Anwesenheit des physischen Modells nicht notwendig. Hierzu reichen lediglich geeignete fotografische Aufnahmen der Deformationen des Fahrzeugs. Es gibt zwei große Anwendungen der 3D-Photogrammetrie in der Verkehrsunfallrekonstruktion. Bei einer Anwendung steht das zu vermessende Fahrzeug zur Verfügung und kann mit einer kalibrierten Kamera fotografiert und das Modell maßstabsgetreu rekonstruiert werden (Fall1). Bei der anderen stehen lediglich geeignete Kameraaufnahmen zur Verfügung und das Modell wird mit einem entsprechenden Programm erstellt (Fall2).

Ein Beispiel für Fall 1 bildet der Versuch im Rahmen der AREC-Tagung 2000 in Neumünster, wo ein Volkswagen Jetta mit 81 km/h mit einem Pfahl kollidierte. Das Fahrzeug wurde jeweils vor und nach dem Versuch mit einer kalibrierten Kamera erfasst und mit dem Programm PhotoModeler dreidimensional ausgewertet. Die beiden Modelle wurden verknüpft. Hiermit konnte beispielsweise die maximale Deformation mit Verschiebung der Punkte im dreidimensionalen Raum gemessen werden. Die beiden 3D-Modelle wurden miteinander verknüpft und sind in Bild 32 dargestellt, das Fahrzeug vor und nach dem Versuch ist in Bild 33 zu sehen. [19,Seite 2-3]

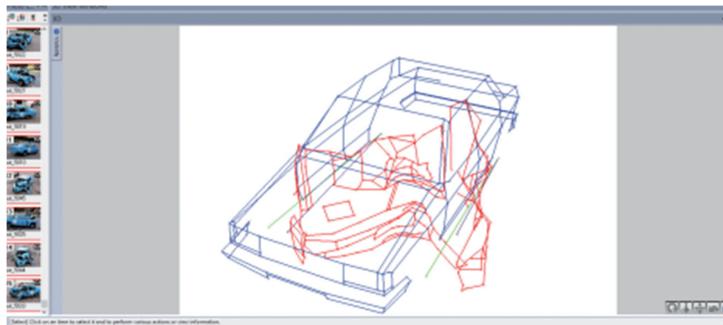


Bild 32: Verknüpfung der beiden dreidimensionalen Photogrammetriemodellen
[19]

Photogrammetrie



Bild 33: Aufnahme des Fahrzeugs vor und nach dem Versuch [19]

Ein Beispiel für Fall 2, bei dem das zu vermessende Objekt für eine Dokumentation nicht mehr zur Verfügung steht, ist der nachfolgend beschriebene Kollisionsversuch eines PKW BMW E36 mit einer Geschwindigkeit von 17 km/h unter einem Winkel von etwa 90° gegen die rechte Seite eines stehenden Ford Escort. Vor dem Versuch wurde am unbeschädigten Kontaktbereich des Fords ein 3D-Modell erzeugt. Dabei wurden drei mittels kalibrierter Kamera erstellten Bilder verwendet und mit dem Programm PhotoModeler bearbeitet. Außerdem wurden Punktemarkierungen angebracht, um den Deformationsverlauf besser bestimmen zu können. Bild 34 zeigt die Versuchsdurchführung des Crashes, Bild 35 die Kollisionsbeschädigungen und die Markierungen am gestoßenen Fahrzeug. [19, Seite 6-8]



Bild 34: Versuchsdurchführung des Crashes (links) [19]

Bild 35: Kollisionsbeschädigung am gestoßenen Fahrzeug (rechts) [19]

Nach der Versuchsdurchführung wurden vom beschädigten Fahrzeug erneut Bilder mit einer kalibrierten Kamera gemacht. Davon wurden drei Bilder verwendet, um ein Modell zu bilden und mit dem Modell des unbeschädigten Fahrzeugs zu

Laserscanning

referenzieren. Anschließend konnte der Deformationsverlauf (rote Punkte rechts in Bild 36) bestimmt werden. In Bild 36 ist die vollständige Modellbildung des beschädigten Fahrzeugs, sowie die Darstellung des Deformationsverlaufs mit dem Programm PhotoModeler zu sehen.

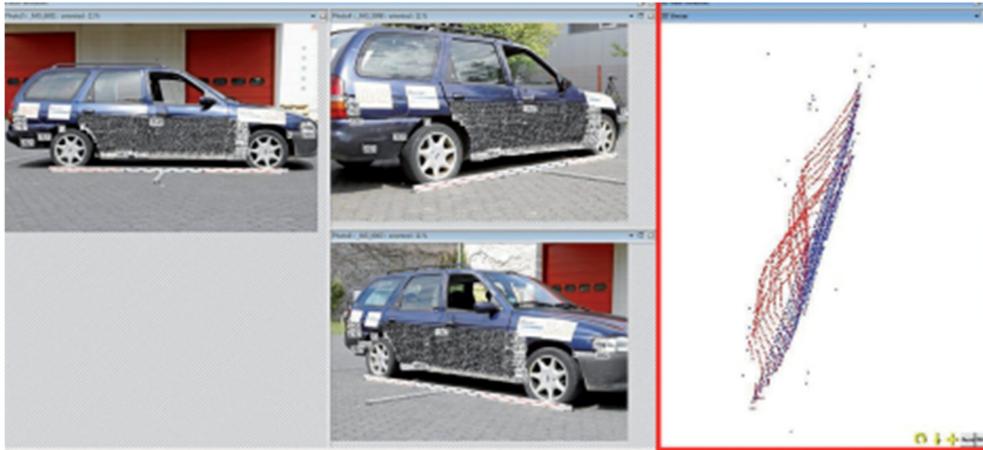


Bild 36: Modellbildung des beschädigten Fahrzeugs mit Verlauf der Deformation [19]

Die zwei Programme, die bei der Verarbeitung von Daten zur 3D-Photogrammetrie am häufigsten genutzt werden, sind Agisoft Metashape und RealityCapture. Agisoft Metashape punktet vor allem bei der Genauigkeit, RealityCapture bei Schnelligkeit und Handhabung [24]. In Kapitel 5 werden Untersuchungen mit diesen Programmen beschrieben. In den Versuchen in Kapitel 6 kommt RealityCapture zum Einsatz.

4 Laserscanning

4.1 Verfahren des Laserscanning

4.1.1 Allgemein

Messsysteme der Photogrammetrie lassen sich grundsätzlich in aktive und passive Systeme einteilen. Passive Systeme, wie z.B. Digitalkameras, sind auf eine externe Beleuchtungsquelle angewiesen, während aktive Systeme eine vom Sensor gesendete elektromagnetische Strahlung zur Beleuchtung verwendet. Laserscanning ist eine polare Messmethode, bei der Flächen aufgenommen und ausgewertet werden. Es werden 3D- Punktwolken für die spätere Modellierung geliefert. 3D-Punktwolken sind Mengen von Punkten in einem dreidimensionalen Koordinatensystem. Über das Rückstreuverhalten können außerdem

Laserscanning

radiometrische Informationen über die beleuchteten Punkte gewonnen werden. Beim Laserscanning wird die Szene im Blickfeld des Sensors mit einem Laserstrahl abgetastet. Es unterscheidet sich von der Fotografie dadurch, dass die Messung der einfallenden Strahlung für alle Pixel eines Bildes gleichzeitig erfolgt. Die vom Sensor ausgesandte Strahlung läuft durch ein Medium (meistens Luft) und wird nach einer Zeit an einem Objekt reflektiert. Die Rückstreuung wird vom Sensor detektiert. Die Strecke vom Sensor zum Objekt wird durch die Zeitdifferenz zwischen Aussenden des Signals und Empfangen der Rückstreuung gemessen. Ein sogenannter Scan entsteht durch eine sequentielle Abtastung des Blickfelds. Der Strahl wird meist durch bewegliche Spiegel oder Drehung der Sende- und Empfangseinheit abgelenkt. Die oben beschriebenen Streckenmessungen und die Winkel- und Richtungsmessungen machen das Laserscanning zu einem polaren Messverfahren. Die sogenannten **LIDAR-** (Light Detection and Ranging) Systeme, auch aktive optische Sensoren genannt, werden bei Entfernungen von mehr als 100 Metern genutzt, insbesondere zur Erdbeobachtung. **RADAR-Systeme**, auch Mikrowellensensoren genannt, arbeiten mit Wellenlängen im mm- bis m-Bereich. **Elektro-optische Systeme** strahlen mit Wellenlängen im nm- bis μm -Bereich.

[17, Seite 66], [16, Seite 431-433]

4.1.2 Reflexion an Oberflächen

Oberflächen werden bei vereinfachten Modellen als Kombination aus ideal spiegelnden (Bild 37 a) und ideal diffusen (Bild 37 b) Komponenten beschrieben.

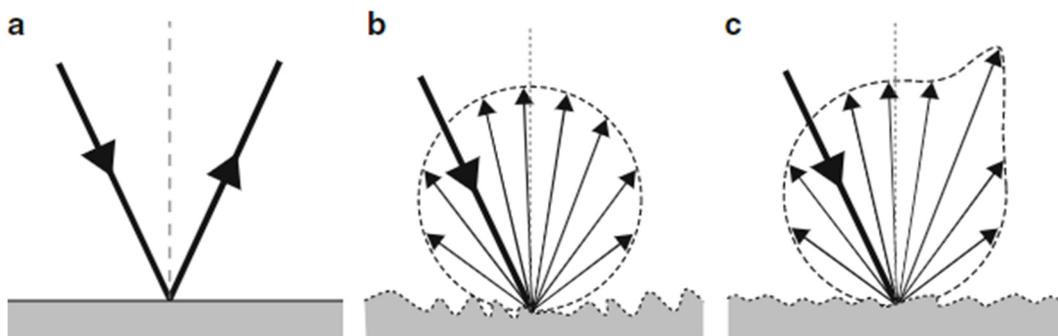


Bild 37: Unterschiedliche Oberflächenreflexionen. (a) Spiegelnde Reflexion, (b) Diffuse Reflexion, (c) Diffuse Reflexion mit Spiegelung [17]

Laserscanning

Eine ideal diffus reflektierende Oberfläche, auch Lambertsche Oberfläche genannt, erscheint bei Bestrahlung von allen Richtungen aus betrachtet gleich hell. Daher wird die Eignung solcher Oberflächen meist durch deren Streuvermögen beschrieben. Je größer die Wellenlänge der Strahlung, desto kleiner wird das Streuvermögen einer Oberfläche und desto geringer wird der Betrag der diffusen Reflexionskomponenten am Gesamtsignal. Das bedeutet, dass das Streuvermögen einer Oberfläche für LiDAR-Systeme deutlich größer ist als für RADAR-Systeme. Außerdem spiegelt eine Oberfläche zunehmend reflektierend, wenn man die Wellenlänge vergrößert. Die Geometrie des Strahlengangs bei der Spiegelung (spiegelnde Reflexion) lässt sich mit dem Reflexionsgesetz beschreiben. Dabei gilt, dass der einfallende Strahl den gleichen Winkel (Inzidenzwinkel) wie der reflektierte Strahl zur Normalen der Oberfläche hat. Außerdem liegen der einfallende, der reflektierende Strahl und die Normale der Oberfläche auf einer Ebene. Wenn der Inzidenzwinkel bei null liegt, führt dies bei Oberflächen mit geringem Streuvermögen zu einer spiegelnden Reflexion. Da aktive Sensoren die Empfangselektronik übersteuern, wirkt sich dies nachteilig auf die Messung aus. Dies tritt bei LiDAR- und Elektro-optischen Systemen beispielsweise beim Scannen von Wasseroberflächen oder metallischen Gegenständen auf. Reale Oberflächen (Bild 37 c) sind weder ideal spiegelnd noch diffus, sie besitzen Eigenschaften beider Oberflächen.

Bei LiDAR-Systemen und RADAR-Systemen ist nur der Anteil des reflektierenden Signals relevant, der auch direkt in Sensorrichtung zurückgestreut wird. Dieser sogenannte Rückstreuquerschnitt hängt von der Blickrichtung des Sensors sowie der Reflexionseigenschaften der Oberfläche ab. [17, Seite 67-68]

4.1.3 Orientierung und Kalibrierung

Jeder Laserscanner gewinnt Daten in seinem jeweiligen Koordinatensystem. Für mathematische Modellierungen des Messvorgangs ist ein sphärisches Koordinatensystem besonders gut geeignet, weil Richtungen und Strecken gemessen werden. Daher wird für die Kalibrierung des Scanners auf dieses Modell zurückgegriffen. Oft wird für die Orientierung von Laserscanner-Messungen auch das kartesische Koordinatensystem genutzt.

Die Methode zur Orientierung von Laserscans ähnelt dem Verfahren zur Orientierung von Bildverbänden sehr stark. Wenn zwei Scans zueinander, bzw. gegenseitig orientiert werden spricht man von relativer Orientierung. Es ist von absoluter Orientierung die Rede, wenn ein oder mehrere Scans in ein übergeordnetes Koordinatensystem geführt werden. Da, im Unterschied zu Bildverbänden, im Laserscanning Strecken gemessen werden, ist für die Lagerung kein Maßstab zu bestimmen. Es können sechs Parameter zur Verdrehung und Verschiebung zweier Sensorkoordinatensysteme für die relative Orientierung ermittelt werden. Bei der relativen Orientierung eines Bildpaares sind es lediglich fünf Parameter.

Bei statischen Laserscanning-Aufnahmen gibt es zwei gewöhnliche Methoden zur Orientierung. Eine Anwendung ist die Orientierung mithilfe von korrespondierenden Punkten. Andererseits können auch alle aufgenommenen Punkte zur Korrespondenzbildung verwendet werden.

Bei dynamischen Laserscanning-Aufnahmen ist die Beobachtung der Bewegung des Scanners erforderlich. Durch die sequenzielle Messung und Bewegung besitzt jeder Messstrahl eine eigene äußere Orientierung. Die 3D-Koordinaten der Objektpunkte werden mittels direkter Georeferenzierung ermittelt. Unter diesem Vorgang versteht man die Zuweisung raumbezogener Referenzpunkte zu einem Geodatensatz. [20] Dabei entstehen jedoch Differenzen im Überlappungsbereich und die Kalibrierung des Gesamtsystems ist ungenügend. Die Kalibrierungsparameter werden daher mit einer Streifenausgleichung geschätzt, um die Diskrepanzen klein zu halten. [16, Seite 458], [20]

4.2 Anwendung in der Verkehrsunfallrekonstruktion

Das 3D-Laserscanning wird unter anderem in der forensischen Tatortdokumentation, dreidimensionalen Gebäudedokumentation, Bauüberwachung, Denkmalschutz und bei der Unfallstellenaufnahme angewendet. Eine präzise 3D-Dokumentation lässt sich in kurzer Zeit erstellen. Mit 3D-Laserscanner lassen sich Bauteile und Produkte in jeglicher Größe und Form vermessen. Daraus lassen sich exakte dreidimensionale Flächenmodelle erstellen. Baustellen, Straßen, Gebäude etc. können in einem Abstand von bis zu 120 m aufgezeichnet werden. Schwierigkeiten treten vor allem bei Regen auf, weil der Lichtstrahl von den Regentropfen reflektiert wird. Beeinträchtigungen aufgrund von Lichtverhältnissen gibt es beim Laserscanning, im Gegensatz zur Fotografie, nicht. Deswegen sind bei Nachtaufnahmen Laserscanner deutlich besser geeignet. Somit sind Laserscanner-Aufnahmen in der Vermessung von Fahrbahnen und Spuren, aber auch in der Vermessung von Deformationen im Karosseriebereich von Fahrzeugen möglich. Im Folgenden werden 3D-Vermessungen von Unfallstellen mithilfe des FARO Focus 3-D-Laserscanner (Bild 38) beschrieben. Das Datenblatt des Scanners ist in Anlage 3 zu finden. [21]



Bild 38: Faro Focus 3D-Laserscanner [21]

Laserscanning

Die Scans werden mit der Herstellersoftware FARO SCENE (Siehe Kapitel 6.3.2] ausgewertet. Damit die einzelnen Scans zu einem Gesamtscan zusammengefügt werden können, benötigt das Programm Referenzpunkte. Dafür werden weiße Kugeln (Zielmarker) mit einem Durchmesser von 20 cm im Scanbereich angebracht. Um die richtige Zuordnung in der Auswertesoftware zu gewährleisten, sollten in jedem Scan mindestens drei Kugeln vorhanden sein. Der Scanner verfügt über einen Touchscreen, mit dem beim Scanvorgang sofort das Ergebnis kontrolliert werden kann. Des Weiteren besitzt der Scanner eine integrierte Kamera, die Farbfotos über einen rotierenden Spiegel erstellt. Dadurch können die Farbinformationen den Punkten der später erstellten Punktwolke zugeordnet werden, damit eine realistischere Abbildung der Unfallszene entstehen kann (siehe Bild 39). Das gesamte Umfeld wird detailgenau erfasst und gemessen, der Anwender muss sich zunächst keine Gedanken über spätere Relevanz von Details der Unfallstelle machen. Wenn der Scanner alle 25m neu aufgestellt wird, können die besten Ergebnisse erzielt werden. Die aufgestellten Zielmarken werden später bei der Software durch den Button „finde Kugeln“ idealerweise automatisch zum



Bild 39: 3D-Punktwolke in Farbe, erzeugt aus zwei Scanpositionen [21]

Zusammenfügen der Scans verwendet. Ansonsten können markante Flächen, zum Beispiel eine Hausmauer, die in mehreren Scans zu finden sind, als Hilfsflächen definiert werden. Eine Schrägstellung des Scanners wird durch einen eingebauten Neigungssensor automatisch erkannt und korrigiert. Eine „flächenhafte Ansicht“ des

Laserscanning

Scanners ist in Bild 40 zusehen. Die beiden Standpunkte des Scanners sind pink, Kugeln und Hilfeebenen grün eingezeichnet. [21]



Bild 40: 3D-Farbscan mit dem Scanner Faro Focus [21]

Auch das in Kapitel 3.5.2 beschriebene Verfahren der 3D-Photogrammetrie zur Vermessung von Deformationen an gekrümmten Flächen, z.B. PKW-Unfall, sind mit Laserscannern möglich. Besonders handgeführte Scanner eignen sich hierzu sehr gut und sind im Gegensatz zur 3D-Photogrammetrie deutlich schneller.

5 Literaturstudium mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen

5.1 Diplomarbeit Pfeiffer Philipp 2020

Herr Pfeiffer versucht in seiner Diplomarbeit, die 2020 veröffentlicht wurde, herauszufinden, wie ein Fahrzeuginnenraum am besten durch ein 3D-Modell dargestellt werden kann. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei beim Bearbeiten der Daten auf der Software „RealityCapture“, die genauer untersucht und das Arbeiten mit dem Programm vorgestellt wird. Es werden zwei Aufnahmeserien eines Testfahrzeugs gemacht und mit verschiedenen Einstellungen in RealityCapture Modelle erstellt und deren Qualität geprüft. [8]

5.1.1 Vorbereitung und Durchführung der Versuche

Beim Fotografieren des schwarzen Audi A5 werden sogenannte Targets (Marker) verwendet, um später die Komponenten-Zusammenführung zu vereinfachen. Diese werden in regelmäßigen Abständen innen und außen am Fahrzeug angebracht. Die Frontscheibe wird zur Minimierung der Reflexion teilweise mit Kreppband abgeklebt. Die Kamera ist dieselbe, die in dieser Arbeit verwendet wird. Das Datenblatt hierzu ist in Anlage 4 zu finden. Die fotografischen Aufnahmen werden in kleinem Abstand von maximal 30° versetzt zueinander um das gesamte Fahrzeug herum gemacht. Dabei sind die Seitescheiben zunächst heruntergelassen, die Türen sind verschlossen. Dies sollen die reflektierenden Flächen weiter eingrenzen.

Anschließend wird der Fahrzeuginnenraum fotografiert. Eine Tür bleibt dabei immer offen, damit sie später bei den Aufnahmen vom Innenraum nicht abgebildet wird. Die Seitenränder und Teilbereiche der Frontscheibe innen werden abgeklebt, damit im späteren Modell der Übergang von Armatur zu Scheibe besser zu erkennen ist.

Von einzelnen Bereichen im Innenraum (z.B. Fahrertür, Beifahrertür, Fußraum) werden Detailaufnahmen gemacht. Später können diese mithilfe der Komponenten-Zusammenführung in Reality Capture dem Gesamtmodell hinzugefügt werden. Zur

Literaturstudium mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen einfachen Handhabung und Stabilisierung wird zudem ein Gimbal eingesetzt. Die Bilder werden im RAW-Format aufgenommen. [8]

5.1.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit

Beim Vergleich der texturierten und berechneten Modelle untereinander können keine großen Unterschiede in der Qualität der Abbildungen festgestellt werden. Die Unterschiede fallen während der Berechnung mit RealityCapture auf. Insbesondere in der Ausrichtung und der Zuordnung der Bilder untereinander in den Komponenten. Der „Normalmodus“ eignet sich für eine schnelle Berechnung sehr gut, die Qualität in Bezug auf den Zeitaufwand ist sehr positiv zu bewerten.

Das Programm kann Fotos mit sehr kleinen Brennweiten (11 mm) sehr gut untereinander zuordnen. Die Qualität der Aufnahmen spielt dabei ebenfalls eine große Rolle. Die Ausrichtung der Bilder funktioniert im RAW-Format deutlich besser, JPG-Aufnahmen können jedoch in eine größere Anzahl an Komponenten aufgesplittet werden. Bei gleichzeitiger kleiner Brennweite (16 mm) müsste die Anzahl der Bilder deutlich erhöht werden, um die Ausrichtung so gut wie mit großer Brennweite hinzubekommen.

Für ein realitätsnahes, möglichst anschauendes 3D-Modell ist es notwendig, möglichst alle Aufnahmen in einer Komponente zu bündeln. Es ist wichtig, dass dazu die Brennweite möglichst groß gewählt oder die Anzahl der Aufnahmen erhöht werden muss. Damit dies funktioniert, hat es sich als praktisch erwiesen die Funktion *Komponenten zusammenführen* in RealityCapture zu verwenden. Falls die Ausrichtung der Bilder keine Bündelung zulassen, können durch diese Funktion in kurzer Zeit mehrere Komponenten in eine zusammengefasst werden. Ein weiteres nützliches Tool ist *Marker erkennen*.

Die Tests, die mit hoher Qualität durchgeführt wurden, führen zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis, da die verwendete Hardware nicht ausreichend ist. Für spätere Auswertungsversuche mit verbesserter Hardware werden Hilfestellungen gegeben. Bei einer zweiter Aufnahmeserie, die lediglich zur Veranschaulichung von Vorschaubilder dienen sollte, wird festgestellt, dass die daraus berechneten Modelle eine deutlich höhere Qualität aufweisen.

Literaturstudium mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen

An diesem Aufnahmetag war es sonnig, weswegen die Fotos im Schatten aufgenommen werden mussten. Außerdem wurden mehr Fotos aufgenommen, insgesamt 213, davon 123 für den Innenraum.

Aus diesem Grund sollte für die Aufnahme der Thematik „Fahrzeuginnenraumdarstellung“ die Anzahl der Aufnahmen auf mindestens 200 erhöht werden. Einzelne Bereiche im Innenraum (Schaltknauf, Lenkrad, Fußraum) sollten zusätzlich ausreichend abgelichtet werden. Da das Programm teilweise Türen im geöffneten und geschlossenen Zustand berechnet, sollten die jeweils geöffneten Türen in den Aufnahmen nicht erscheinen. Die Qualität und Anzahl der Aufnahmen haben den größten Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses. Die Verwendung von unterschiedlichen Bildformaten spielt eine untergeordnete Rolle. Bestmöglich sollte das Wetter am Aufnahmetag leicht bewölkt und das Versuchsobjekt gleichmäßig ausgeleuchtet sein. [8]



Bild 41: Texturiertes Modell vom ersten Aufnahmetag (links) [8]

Bild 42: Texturiertes Modell vom zweiten Aufnahmetag (rechts) [8]

5.2 Studienarbeit Richter Philipp 2020

Herr Richter setzt sich in seiner Studienarbeit aus dem Jahr 2020 das Ziel, ein 3D-Modell von einem Fahrzeuginnenraum mittels der Software RealityCapture zu erzeugen. Dieses Modell soll in der Unfallrekonstruktion bei der Prüfung der Sichtverhältnisse des Fahrers herangezogen werden. Mit der Lage des Augpunktes und der individuellen Fahrzeuggeometrie sollen entstehende Sichtbehinderungen herausgefunden werden. Beispielsweise kann dies eine Verdeckung der Fahrersicht durch eine der beiden A-Säulen sein. In dieser Studie wird dazu die vordere Fahrzeugkabine zur Erstellung des 3D-Modells genutzt. [23]

Literaturstudium mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen

5.2.1 Vorbereitung und Durchführung der Versuche

Im ersten Versuch wird versucht, einen allgemeinen Arbeitsablauf der wichtigsten Arbeitsschritte vom Foto bis zum fertigen 3D-Modell zu geben und damit einen Einstieg in die Software RealityCapture zu finden. Die Reflexionen der Fahrzeugkarosserie und Scheiben einer 3er-BMW F30 sollen untersucht werden. Als Kamera wird die Canon C7X benutzt, die technischen Daten können der Anlage 3 entnommen werden.

Im zweiten Experiment wird der Innenraum des 3er-BMW mit derselben Kamera ohne Stativ und Selbstauslöser erfasst. Dabei werden insgesamt 105 Fotos gemacht und daraus ein 3D-Modell erstellt.

Im dritten Versuch werden zur Erstellung des 3D-Modells 189 Fotos vom Fahrzeuginnenraum eines Opel Corsa D gemacht. Der Ablauf der Fotoerfassung ist derselbe, wie im zweiten Versuch. Es wurden jedoch 85 Fotos mehr als beim BMW erstellt. Da der Innenraum des Opels deutlich weniger Details aufweist und die Materialien weniger spiegeln, wird für die nachfolgenden Experimente der Fahrzeuginnenraum des Opel Corsa genutzt.

Für den vierten Versuch werden die Seitenspiegel, der Rückspiegel und die Scheiben des Opels mit Malerband abgeklebt, um auch die Fensterscheiben im 3D-Modell darzustellen und die Reflexionen der Scheiben zu brechen. Die Anzahl der fotografischen Aufnahmen wird weiter auf insgesamt 595 Fotos erhöht.

Die Aufnahmen des fünften Versuchs erstellt ein Fotograf mit einer Spiegelreflex Nikon 610D und einem Stativ. Die technischen Daten der Kamera sind in Anlage 6 zu sehen. Weil Fokus und Belichtung für jedes Foto extra eingestellt werden müssen, ist der Zeitaufwand sehr hoch. Deswegen werden nur insgesamt 98 Fotos gemacht.

Im sechsten und letzten Versuch wird die Spiegelreflexkamera aus Anlage 6 ausgeliehen, um damit mehr Fotos zu machen. Die Außenspiegel und der Rückspiegel werden abgeklebt und es werden insgesamt 720 Fotos Freihand fotografiert. [23]

Literaturstudium mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen

5.2.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit

Die Studie kommt zum Ergebnis, dass eine große Anzahl von Fotos, sowie die Benutzung einer guten Spiegelreflexkamera für die Erstellung eines 3D-Modells empfohlen werden. Es gilt, je qualitativ hochwertiger die Fotos, desto höher die Qualität des erstellten 3D-Modells.

Beim Fotografieren ist es sehr wichtig, dass die Gesamtszene nicht verändert wird. Wenn das Fahrzeug umgeparkt wird, sollten im Nachhinein keine Fotos mehr erstellt werden. Der Zustand des Fahrzeugs vor dem Fotografieren sollte ordentlich bzw. aufgeräumt sein.

Die direkte Sonneneinstrahlung kann zu Schattenbildungen während des Fotografierens führen. Daher ist es ratsam, das Fahrzeug extern zu beleuchten, oder in den Schatten zu stellen.

Die Spiegel sollten vor dem Fotografieren abgeklebt werden. Das gleiche gilt für hochwertige, spiegelnde Materialien im Fahrzeuginnenraum. Hier könnten spezielle Sprays für 3D-Photogrammetrie oder Babypuder zum Einsatz kommen.

Scheiben des Fahrzeugs werden von dem Programm RealityCapture nicht erkannt. Um diese sichtbar zu machen, können sie mit Malerband abgeklebt werden oder eine Decke von außen über die Scheibe gelegt werden. Eine Darstellung der Scheibe ist für die Prüfung der Sichtverhältnisse nicht notwendig, da die Abgrenzungen zu den A-Säulen etc. gut zu erkennen sind.

Es sollte versucht werden, eine maximale Entfernung vom fotografierten Objekt im Innenraum zur Kamera herzustellen. Dabei soll aus möglichst vielen Positionen, unterschiedlichen Winkeln, Distanzen und Höhen fotografiert werden. Es ist von Vorteil, eine Fahrzeughür zu öffnen und durch diese zu fotografieren. Eine größere Distanz kann auch gewonnen werden, wenn z.B. von der Rücksitzbank aus Fotos aufgenommen werden. Die Position der Kamera sollte vor jedem Foto verändert werden. In Anlage 7 befindet sich eine Tabelle zur Zusammenfassung der Versuchsergebnisse, wobei Fotoausrichtungen, Rekonstruktionen und Texturierung der jeweilig erstellten 3D-Modelle von Fahrzeuginnenräumen

Literaturstudium mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen verglichen werden. Die Ergebnisse aus Versuch eins und fünf sind darin nicht enthalten. [23]



Bild 43: Texturiertes 3D-Modell vom Fahrzeuginnenraum des Opel Corsa im sechsten Versuch [23]

5.3 Diplomarbeit Helbig Frank 2021

Herr Helbig vergleicht in seiner Diplomarbeit aus dem Jahr 2021 Untersuchungen zur dreidimensionalen Vermessung von Unfallstellen. Dazu werden alle verfügbaren Quellen analysiert und der Stand der Technik bei der Anwendung der 3D-Photogrammetrie zur Vermessung von Unfallstellen gezeigt. Des Weiteren wird ein Versuchsplan zur Untersuchung der Verwendung von verschiedenen Daten bei der Vermessung von Unfallstellen erarbeitet. Diese Ergebnisse dazu werden bewertet und daraus ergebene Schlussfolgerungen definiert. [24]

5.3.1 Vorbereitung und Durchführung der Versuche

Die Versuche zur Vermessung werden an nur einem Tag durchgeführt, das Wetter war trocken, bewölkt, teilweise sonnig mit Temperaturen von 7 bis 12 Grad. Somit herrschen ideale Bedingungen. Zunächst werden 14 Punktplatten (siehe Anlage 8) in Form einer Straße ausgelegt und befestigt. Diese werden anschließend mit einem Tachymeter (siehe Anlage 9) vermessen. Später wird der gesamte Bereich mit

Literaturstudium mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen einem 3D-Laserscanner (siehe Anlage 10) gescannt. Die Aufnahmen des Tachymeters und 3D-Laserscanners dienen später als Referenz. Zuletzt werden Fotos mit einer Drohne (siehe Anlage 11) und einer Kamera (siehe Anlage 4) mit unterschiedlichen Brennweiten und aus verschiedenen Höhen erstellt. Aus diesen fotografischen Aufnahmen werden jeweils separate und gemeinsame Punktwolken der unterschiedlichen Brennweiten mit den Programmen RealityCapture und Agisoft Metashape erzeugt. In die genaueste Punktwolke werden die aufgenommenen Fotos integriert und zu jeweils einer gemeinsamen Punktwolke kombiniert. Diese werden abschließend unterschiedlich koloriert. Aus diesen Punktwolken werden die Koordinaten der Punktplatten durch die Programme CloudCompare und PC-Crash in Kombination mit Autodesk DWG True View ausgelesen. Um die Abweichungen zu berechnen, werden die Koordinaten in Microsoft Excel in die Referenzkoordinaten transformiert. Neben diesem mathematischen Vergleich erfolgt auch ein optischer Vergleich mit der Software CloudCompare. [24]

5.3.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit

Um die bestmöglichen Ergebnisse zu erreichen, sollte die Kamera den größtmöglichen Bildsensor besitzen. Dadurch ergibt sich ein größeres Bildformat mit einer höheren Genauigkeit. Um die Brennweite nicht zu vergrößern und einen größtmöglichen Bildausschnitt zu erzielen, sollte die Kamera einen Crop-Faktor von 1 aufweisen. Die Blendenzahl sollte so klein wie möglich und damit der Anfangs-Öffnungsdurchmesser so groß wie möglich sein. Dadurch wird das Objektiv lichtstark. Um den größtmöglichen Bereich im Bild scharf abzubilden, ist eine große Schärfentiefe wichtig. Nach einer Untersuchung über den kleinsten maximalen Gesamtdistanzfehler kam es zum Ergebnis, dass die Brennweite 35 mm oder 16 mm betragen soll. Um die Genauigkeit zu steigern, sollte die Verzeichnung möglichst klein sein. Die Lichtempfindlichkeit (iso-Wert) sollte gering eingestellt sein, damit Bildrauschen vermieden wird. Eine gleichmäßige Ausleuchtung ohne Blitz sollte gegeben sein. Die Straße und das Wetter sollten trocken und bewölkt, aber hell sein. Direkte Sonneneinstrahlung ist zu vermeiden. Autolack und Glasscheiben sollen vor der Aufnahme mattiert werden. Um die maximale Qualität und die Meta-Daten zu erhalten, sollten Fotos im RAW-Format abgespeichert

Literaturstudium mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen werden. Um die Genauigkeit zu steigern, sollte vor dem erstmaligen Arbeitsbeginn mit Reality Capture ein Reset des Programms durchgeführt werden. Bei der Auswertung nach der Photogrammetrie-Software schneidet Agisoft Metashape am besten ab mit einem Mittelwert des größten Gesamtdistanzfehlers von 0,0352 m. Den zweiten Platz belegt die Software RealityCapture mit einem Mittelwert des maximalen Gesamtdistanzfehlers von 0,1441 m. RealityCapture arbeitet im Vergleich jedoch deutlich schneller. Wenn höchste Genauigkeit gefordert ist, sollte Agisoft Metashape in der Rekonstruktionseinstellung MITTEL verwendet werden. Soll es jedoch schnell und unkompliziert gehen und eine Genauigkeit von sieben Zentimetern (maximal größte gemessene Abweichung) ausreicht, dann ist RealityCapture in der Rekonstruktionseinstellung NORMAL die richtige Wahl. Folgende Leistungen sollte die Computerkonfiguration aufweisen, um die Hardware-Grenzen von RealityCapture anzuheben: CPU: AMD Ryzen 9 5950X 16-Kerne, GPU: 2xNVIDIA GeForce RTX 3080 10GB, RAM: 128GB DDR4, Speicherkapazität (SSD): 2x 2TB NVMe SSDs. Es sollte in Zukunft ausschließlich mit RealityCapture gearbeitet werden, um Zeit zu sparen, solange es nicht auf die höchste Genauigkeit ankommt. Die Punktwolken sollen nur noch mit CloudCompare miteinander auf Genauigkeit untersucht werden, um Toleranzen beim Auswählen der Punktplattenpunkte zu entfernen (Referenz-Punktwolke oder -Mesh vorausgesetzt). Sobald in der Arbeit beschriebene Drohnen verfügbar sind, könnte eine neue Versuchsreihe gestartet werden. [24]

5.4 Diplomarbeit Richter Philipp 2021

Herr Richter versucht in seiner Diplomarbeit einen Wert für die Genauigkeit mittels 3D-Photogrammetrie erstellter 3D-Punktwolken beziehungsweise 3D-Modellen eines fiktiven Unfallortes zu ermitteln. Die 3D-Punktwolken von einem Straßenverlauf werden mit den Softwarelösungen RealityCapture und Agisoft Metashape erstellt. Zum Fotografieren wird eine Spiegelreflexkamera mit verschiedenen Objektiven genutzt, um den Einfluss der verschiedenen Brennweiten aufzuzeigen. Zudem sollen 3D-Punktwolken des Straßenverlaufs mit fotografischen Drohnenaufnahmen erstellt und analysiert werden. Als Referenz dient eine Vermessung mittels Totalstation. [25]

5.4.1 Vorbereitung und Durchführung der Versuche

Die Versuchsreihen werden an zwei verschiedenen Tagen durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe sind die äußeren Bedingungen sonnig und trocken, in der zweiten ist die Straße nass und der Himmel bewölkt. Zunächst werden 14 Punktplatten (siehe Anlage 8) entlang des Straßenverlaufs ausgelegt und im Boden verankert (siehe Bild 43). Die XYZ-Koordinaten der Referenzpunkte werden mittels des elektronischen Tachymeters GeoMax Zoom90 (siehe Anlage 9) vermessen. Der Straßenverlauf wird anschließend mit einer Spiegelreflexkamera (siehe Anlage 4) und einem Hochstativ mit einer Länge von 5,35 m fotografiert. Dabei werden Objektive mit verschiedenen Brennweiten eingesetzt. Danach wird aus Augenhöhe mit einer kleineren Brennweite fotografiert. Aus etwa fünf Metern Höhe werden zudem Aufnahmen mit der Drohne DJI Phantom FC300X (siehe Anlage 11) gemacht. Für die Erstellung der 3D-Punktwolken werden die Softwarelösungen RealityCapture und Agisoft Metashape eingesetzt. Zur Vergleichbarkeit der 3D-Punktwolken werden die Punkte mit der Transformationsgleichung in das übergeordnete Koordinatensystem des Tachymeters transformiert. Als Wert für die Genauigkeit dient der Abstand zwischen den transformierten Punkten der 3D-Punktwolke und den gemessenen Punkten des Tachymeters. [25]

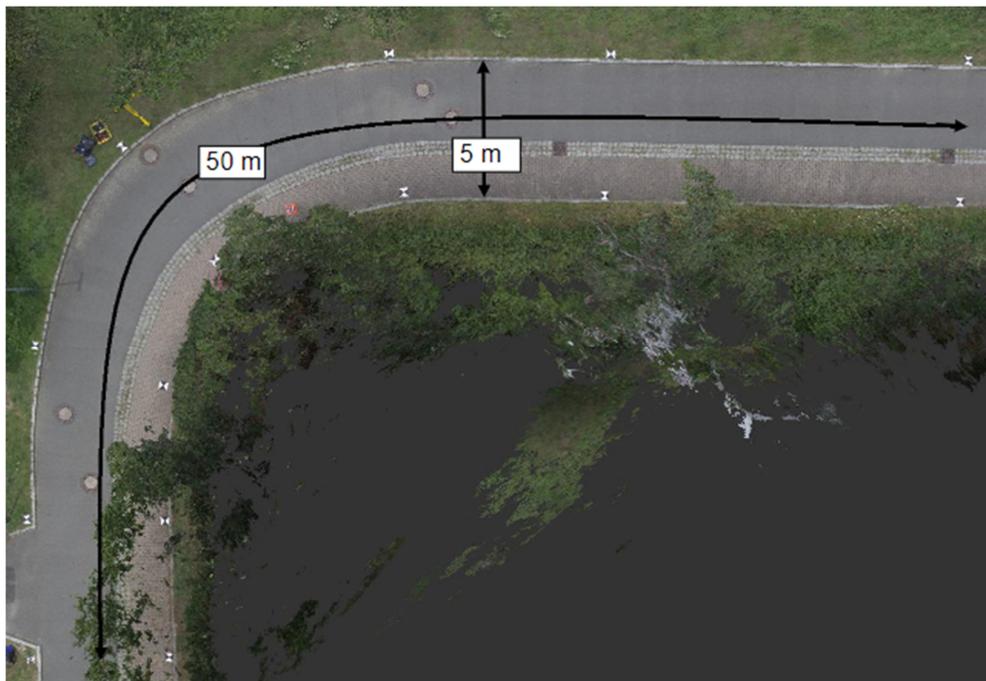


Bild 44: Straßenverlauf/ fiktiver Ort der Versuchsreihen [25]

Literaturstudium mit kritischer Würdigung bereits durchgeführter Untersuchungen

5.4.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit

Das Ziel, einen Wert für die Genauigkeit mittels 3D-Photogrammetrie erstellter 3D-Punktwolken zu ermitteln, kann erreicht werden. Die in der Arbeit ermittelte durchschnittliche Abweichung beträgt 0,012 m. Die maximale Abweichung beträgt 0,03 m. Da der Straßenverlauf 50 m lang und 5 m breit ist und zudem einen Höhenunterschied von 0,5 m aufweist, kann hier von einem guten Ergebnis gesprochen werden. Da in der Auswertemethode zudem Toleranzen entstehen, kann der wahre Wert der Abweichungen sogar noch geringer sein.

Durch die Ergebnisse der Versuche kann die Möglichkeit, Unfallstellen maßstabsgetreu und fotorealistisch im dreidimensionalen Raum mit einer hohen Genauigkeit darzustellen, bestätigt werden. Fahrzeugbewegungen und der Unfallhergang können im Simulationsprogramm sinnvoll genutzt werden.

Es finden auch andere wissenschaftliche Projekte zur 3D-Photogrammetrie in der Unfallrekonstruktion, beispielweise zur Modellierung von Fahrzeuginnenräumen, statt.

Da die 3D-Photogrammetrie-Softwarelösungen ständig weiterentwickelt werden, können in Zukunft noch genauere 3D-Punktwolken und Ergebnisse erwartet werden. Daher kann mit einem zunehmenden Einsatz der 3D-Photogrammetrie in der Unfallrekonstruktion gerechnet werden. [25]

Tabelle 2: Auswertung nach verwendetem Objektiv [25]

Objektiv nach Brennweite in mm	Mittelwert der durchschnittlichen Gesamtdistanzfehler in mm
10 mm	0,013
16 mm	0,009
24 mm	0,014

6 Konzeption der Versuche

Im folgenden Kapitel wird die Konzeption der Versuche vorgestellt. Zunächst werden Innenraumaufnahmen eines gewählten Fahrzeugs mit einer Spiegelreflexkamera, einem 3D-Laserscanner und einer Panoramakamera erstellt. Daraus werden 3D-Punktwolken mit Softwarelösungen der 3D-Photogrammetrie erzeugt und später miteinander verglichen.

6.1 Messfahrzeug

Zunächst muss ein Fahrzeug gefunden werden, von dem Aufnahmen des Interieurs gemacht werden sollen. Da die Versuche auf dem Gelände der Firma CLAUSS [18] in Zwönitz stattfinden sollen, bietet es sich an, ein Fahrzeug des Unternehmens zu verwenden. Dabei handelt es sich um einen Renault Kangoo Typ W in der Farbe Weiß, der von 2008 bis 2021 gebaut wurde. (siehe Bild 45). Ein großer Vorteil dieses Fahrzeugs ist, dass durch die Raumaufteilung des Kastenwagens viel Platz zum Fotografieren des Innenraums gegeben ist. [26], [27]



Bild 45: Bilderserie Versuchsfahrzeug

6.2 3D-Photogrammetrie

Bei diesem Versuch soll mit einer Spiegelreflexkamera der Innenraum des Versuchsfahrzeugs fotografiert werden. Mithilfe der Software RealityCapture wird daraus eine 3D-Punktewolke erzeugt.

6.2.1 Equipment

Bei der Kamera, mit der die Fotos des Innenraums erstellt werden sollen, handelt es sich um die Canon 6D mit Vollformatsensor (siehe Anlage 4), die beispielsweise auch in der Diplomarbeit von Herrn PFEIFFER [8] verwendet wurde. Die Objektive, welche für die Bilderserien verwendet werden sollen, sind das Canon EF 16-35mmf/2.8: II USM (siehe Anlage 12), welches ebenfalls in der Arbeit von PFEIFFER [8] bereits Verwendung fand und das Samyang XP 10mm f/3.5 Canon EF (siehe Anlage 15), das in der Arbeit von Herrn HELBIG [24] eingesetzt wurde. Außerdem sollen Marker zum Einsatz kommen.

Marker

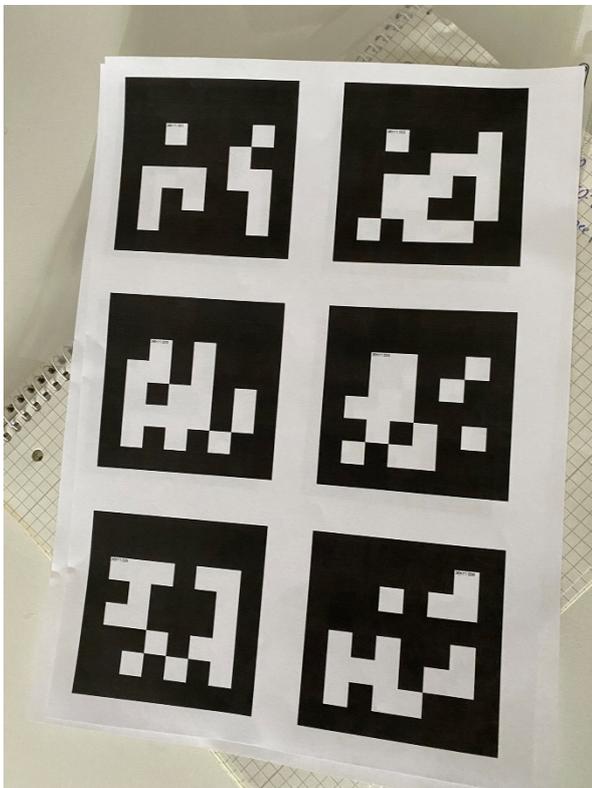


Bild 46: Marker für den Versuch

Marker sind spezielle, auf flache Oberfläche gedruckte, kontrastreiche Muster, die wegen ihrer speziellen Form aus jedem Blickwinkel genau lokalisiert werden können. Jeder Marker hat zusätzliche Markierungen innerhalb oder nahe dem Marker, um jeden einzelnen Marker eindeutig identifizieren zu können. Diese Daten werden neben der Identifizierung genutzt, um Markierung von zufälligen Mustern im Bild zu unterscheiden. Es gibt verschiedene Markierungstypen, z.B. kreisförmig, einzelner Ring oder quadratisch. Die Marker, die im Versuch eingesetzt werden sollen,

Konzeption der Versuche

sind in Bild 46 zu sehen. Diese werden mit Klebeband gleichmäßig im Innenraum des Fahrzeugs befestigt. [31]

6.2.2 Anfertigen der Bildserien

Im Hilfemenü der Software RealityCapture und der in Kapitel fünf beschriebenen wissenschaftlichen Arbeiten werden einige Hilfestellungen gegeben, die im Folgenden aufgelistet werden.

- Die Anzahl der Bilder sollte nicht beschränkt werden, es sollen mindestens 200 Aufnahmen gemacht werden.
- Die höchstmögliche Auflösung soll verwendet werden.
- In der Szenenoberfläche soll jeder Punkt mindestens zwei qualitativ hochwertigen Bildern zugeordnet werden können. Es können dabei auch mehr sein.
- Bei der Aufnahme sollte sich der Fotograf kreisförmig um das Objekt herumbewegen und keinesfalls an einem Punkt stehen bleiben.
- Der Blickwinkel sollte nicht mehr als 30 ° geändert werden.
- Grob-zu-Fein-Regel: Zuerst sollte das ganze Objekt fotografiert werden, danach kann sich auf Details konzentriert werden.
- Schleifen sollen vervollständigt werden. Am besten wird an der Stelle die Aufnahme beendet, an der sie begonnen wurde.
- Das aufzunehmende Objekt sollte gut ausgeleuchtet sein, dabei sollen Blitzlichtaufnahmen sowie direkte Sonneneinstrahlung vermieden werden.
- Die Gesamtszene darf während des Fotografierens nicht verändert werden, weil sonst die Bilderzuordnung nicht funktioniert.
- Während einer Aufnahmeserie sollten alle Fotos mit der gleichen Brennweite erstellt werden.
- Um Rauschen in den Aufnahmen zu verhindern, sollte der ISO-Wert so niedrig wie möglich sein.
- Um Unschärfe durch leichte Bewegungen zu vermeiden, sollte die Verschlusszeit nicht zu langsam gewählt werden.
- Das Abspeichern der Bilder sollte möglichst im RAW-Format erfolgen, um alle Aufnahmeinformationen zu erhalten.

Konzeption der Versuche

- Es sollen möglichst homogene und spiegelnde Oberflächen vermieden werden.
- Auf Polarisationsfehler ist zu verzichten, da er bei falscher Bedienung das Ergebnis verschlechtert.
- Von der Nachbearbeitung von Fotos wird abgeraten, weil wichtige Bildpunkte zur Merkmalerkennung verloren gehen können.

[8], [23], [24], [25], [30]

6.2.3 Software RealityCapture

Für die Erstellung der 3D-Punktwolke wird die Software RealityCapture verwendet, da dieses Programm nach HELBIG [24] im Gegensatz zu Agisoft Metashape schneller und unkomplizierter arbeitet. Diese Photogrammetrie-Software kann die Verzeichnung in Bildern sichtbar machen. Sie wird hauptsächlich eingesetzt, um aus Fotos und/oder Laserscans 3D-Punktwolken, orthogonale Fotos oder vermessene 3D-Modelle zu entwickeln. Die Software wurde vom slowakischen Start Up CapturingReality mit Sitz in Bratislava veröffentlicht. Seit März 2021 wird das Programm vom Unternehmen Epic Games, welches unter anderem durch das Videospiel Fortnite bekannt ist, geführt. Die Software wird in das Unreal Engine-Ökosystem von Epic Games integriert. Für die Diplomarbeit wird die Version 1.2, als Pay Per Input (PPI) Variante verwendet. Das bedeutet, dass das Programm bis zum Exportieren im vollen Umfang komplett kostenlos ist. Die Kosten für das Exportieren von Punkten sind dabei abhängig von der Auflösung und Anzahl der Bilder. Es steht zudem eine Vollversion für 3623,55 Euro zur Verfügung. [24], [32], [33]

6.2.3.1 Anforderungen

Folgende Hardware-Anforderungen stellt das Programm:

- 64bit System mit mindestens 8GB RAM (empfohlen werden mindestens 16GB Ram)
- 64bit Microsoft Windows Version 7/8/8.1/10 oder Windows Server Version 2008+

Konzeption der Versuche

- NVIDIA Grafikkarte mit CUDA 3.0+ (1024 CUDA Kerne empfohlen)

Das Arbeiten ohne NVIDIA-Grafikkarte ist grundsätzlich zwar möglich, es kann jedoch kein Mesh erzeugt werden. [34]

6.2.3.2 Workflow

Für das Arbeiten mit RealityCapture benötigt es grundsätzlich nicht viel Grundkenntnisse, da das Programm selbst Schritt für Schritt Hilfestellungen gibt. Nach erfolgreichem Erstellen der Aufnahmen und Öffnen der Software gelangt man in die Benutzeroberfläche (Bild 47). Man sieht ein Layout mit drei Fenstern, welches jederzeit auch anders aufgeteilt werden kann über die Schalter links oben (Bild 48). Man sieht im linken Fenster die Hilfestellung von RealityCapture, in der Mitte die 2D-Ansicht und rechts eine Rastereinteilung mit der Bezeichnung 3D, wo später das berechnete Modell angezeigt werden soll. Klickt man auf „Schnellstart“ wird man durch den Prozess von Anfang bis Ende durch das Programm geführt. [35], [36]

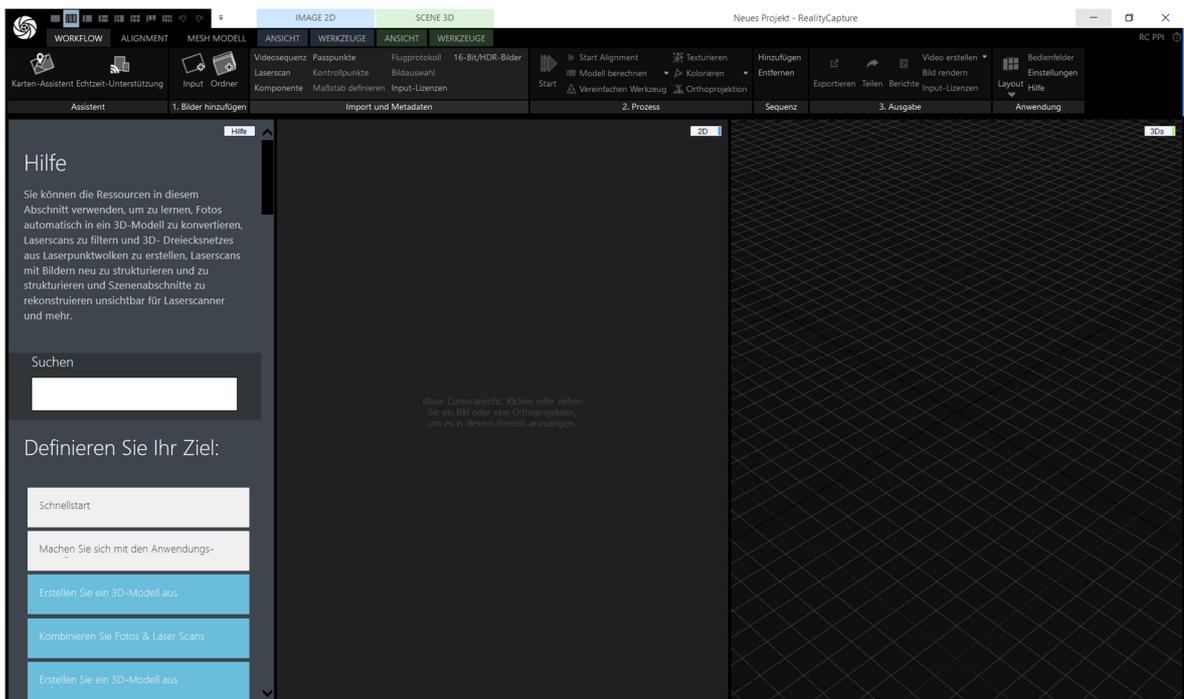


Bild 47: Startmenü RealityCapture



Bild 48: Layouteinstellungen RealityCapture

Konzeption der Versuche

Bilder hinzufügen

Im ersten Schritt werden die zuvor aufgenommenen Bilder dem Programm hinzugefügt. Es gibt dazu mehrere Möglichkeiten. Man klickt die Registerkarte „Workflow“ an und wählt die Schaltfläche „Bild“ an, um ein oder mehrere Bilder hinzuzufügen. Über die Schaltfläche „Ordner“ ist es möglich, alle Bilder und/oder Scans in einem Ordner hinzuzufügen. Außerdem können die Fotos per „Ziehen und Ablegen“ eingesetzt werden. [36]



Bild 49: Bilder hinzufügen in RealityCapture

Die Bilder werden im mittleren Fenster in der 2D-Ansicht angezeigt (Bild 50). Die einzelnen Ansichten können immer gewechselt werden.

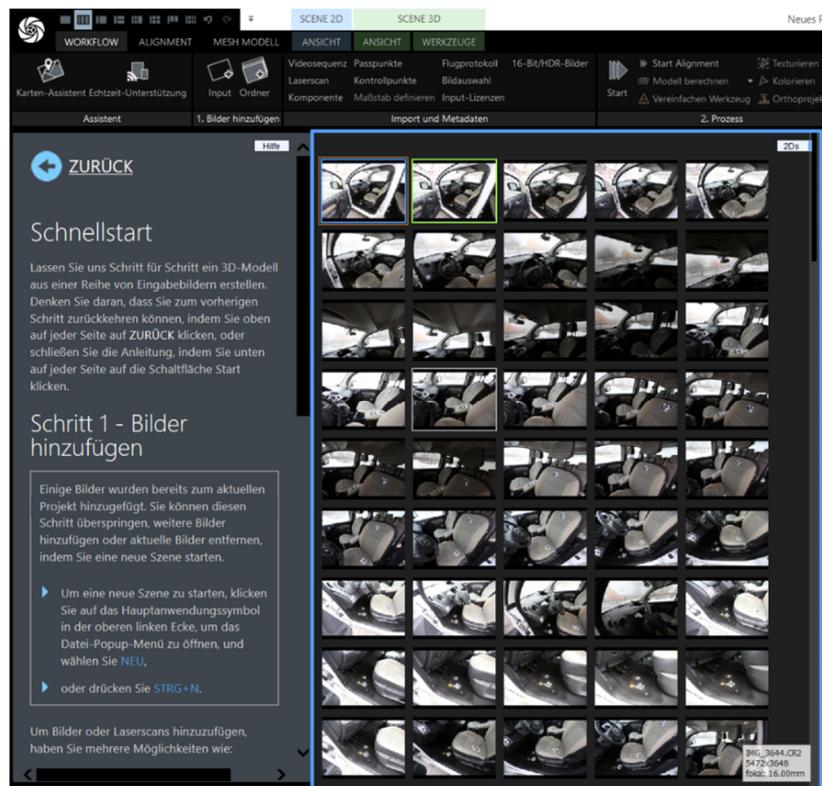


Bild 50: Hinzugefügte Bilder in RealityCapture

Konzeption der Versuche

Mit dem Button „Fortsetzen“ werden im Hilfemenü die verschiedenen Layouts der Oberfläche erklärt. Es empfiehlt sich, gerade als Laie, im 1+1+1 Layout weiterzuarbeiten. Das Bild, welches gerade ausgewählt wird, erhält eine blaue Umrandung, um es auch in den anderen Fenstern leicht wiederzufinden. Es können auch weitere Bilder verschiedenfarbig markiert werden. Durch weiteres Bestätigen des „Fortsetzen“-Buttons gelangt man zu Schritt 2, dem Ausrichten der Bilder. [36]

Bilder ausrichten und Marker erkennen

In diesem Prozess der Bildregistrierung oder Bild-Alignment werden Kamerapositionen, Orientierungen und interne Kamerazustände, wie beispielsweise Zoom, für jedes Eingangsbild berechnet. Nach der abgeschlossenen Berechnung ist zu erkennen, wie sich der Fotograf während der Aufnahme bewegt hat. [36]

Herr Pfeiffer fand heraus, dass die Funktion „Marker erkennen“ an dieser Stelle sehr nützlich ist. Die vor dem Fotografieren ausgelegten Marker (Kapitel 6.2.1) werden durch diese Funktion automatisch erkannt. Dadurch wird die Zuordnung der Bilder untereinander deutlich verbessert und ist im Gegensatz zur Lokalisierung von Hand viel schneller und zudem genauer. Unter der Schaltfläche „Alignment“ ist der Button „Marker erkennen“ zu finden. Nach Betätigung erscheint unter dem Hilfefenster eine Tabelle (siehe Bild 51).

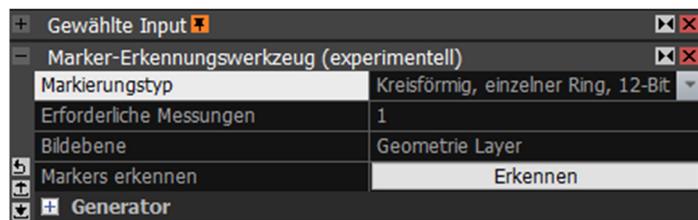
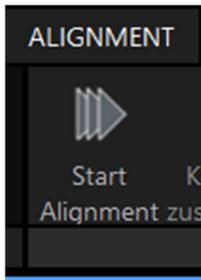


Bild 51: Marker erkennen in RealityCapture

Unter „Markierungstyp“ können verschiedene Marker ausgewählt werden. Nach Klicken auf „Erkennen“ startet die Suche nach Markern. Dies dauert in der Regel nur wenige Sekunden. [8], [36]

Jetzt kann unter der Schaltfläche „Alignment“ der Vorgang durch den Button „Start Alignment“ (Bild 52) begonnen werden.

Konzeption der Versuche



Der Vorgang dauert je nach Anzahl und Qualität der Bilder wenige Minuten. Hundert Bilder dauern laut Reality Capture ungefähr zwei Minuten. Ist der Prozess abgeschlossen, erscheint im rechten Fenster eine Punktwolke. Die erkannten Marker werden angezeigt (siehe Beschriftungen 36h11:00. in Bild 53).

Bild 52: Start Alignment

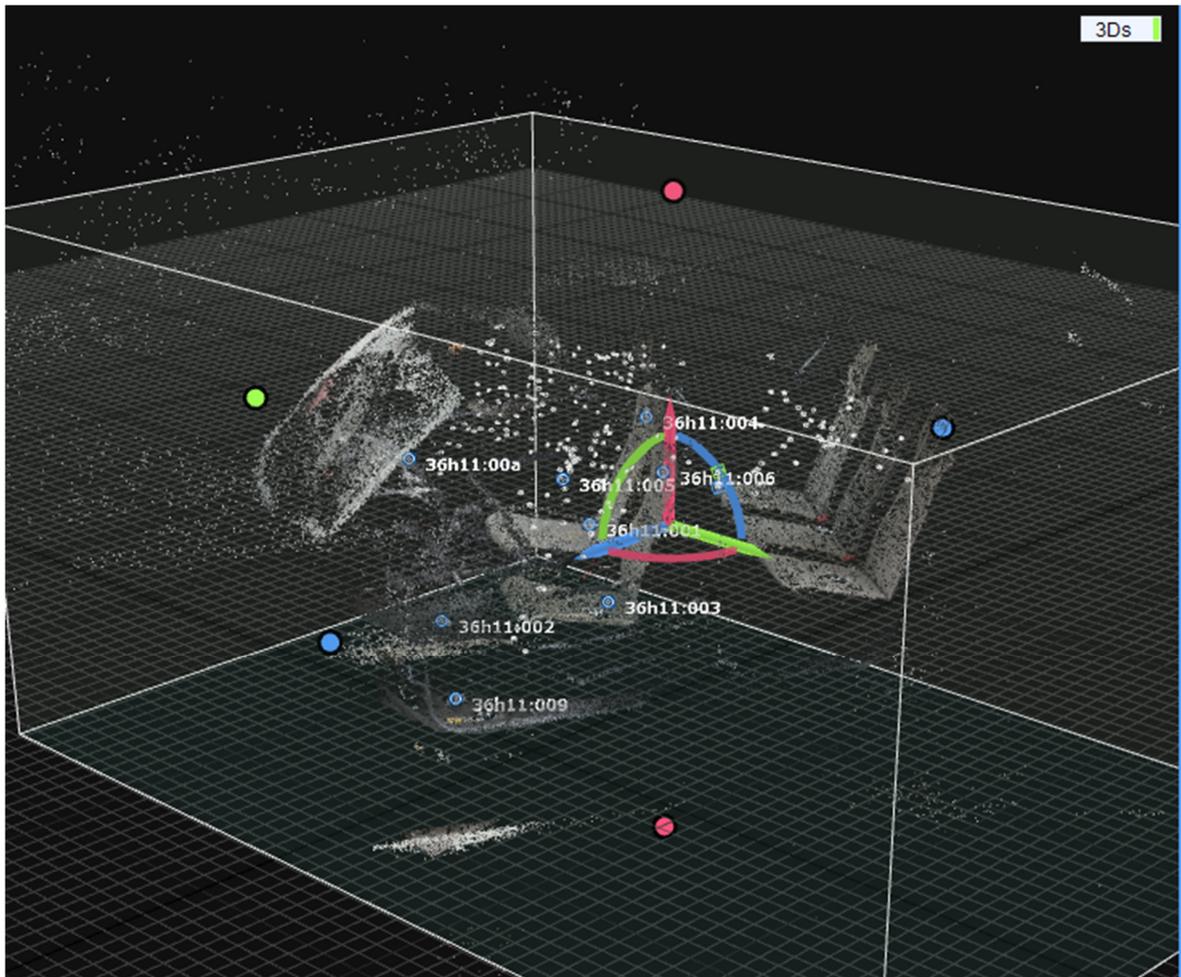


Bild 53: Erstellte Punktwolke mit erkannten Markern

Es wurden mehrere Komponenten in RealityCapture erstellt. Eine Komponente ist eine Gruppe von Bildern, die miteinander ausgerichtet sind. Am besten ist es, wenn aus der kompletten Bildserie nur eine Komponente errechnet wird. Dies passiert, wenn disjunkte Szenen vorhanden sind, Bilder verschwommen sind, die Objekttextur schwach ist, nicht genügend Bilder vorhanden sind oder die Perspektive zu hoch ist. Komponenten können dazu auch durch Komponentenzusammenführung vereint werden. Eine Szene beinhaltet eine

Konzeption der Versuche

oder mehrere Komponenten. Jede Szenenkomponente hat ein spärliches 3D-Modell und eine Kameraposition. In der 1D-Ansicht kann die Komponente mit den meisten zugeordneten Bildern zur Weiterverarbeitung ausgewählt werden. Die Komponente 0 in Bild 53 enthält 200 Kamerapositionen. In dieser 1D-Darstellung sind außerdem die unter dem Reiter „Kontrollpunkte“ die erkannten Marker zu sehen. [8], [36]

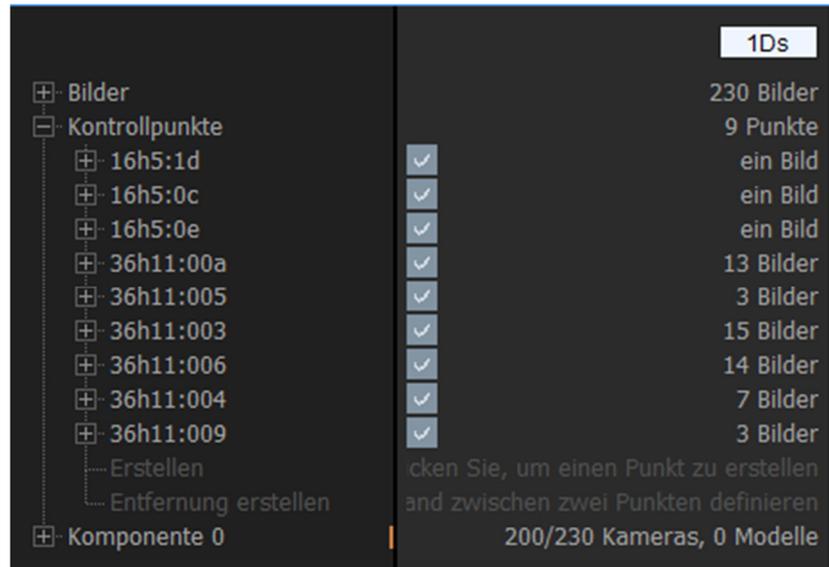


Bild 54: 1D-Ansicht der ausgewählten Komponente

Modellberechnung

Vor der Modellberechnung muss die Rekonstruktionsregion noch festgelegt werden. Ein automatisch erstelltes Rechteck kann durch Verschiebung der Seiten so angepasst werden, dass der gewünschte Bereich berechnet werden kann (siehe Bild 55).

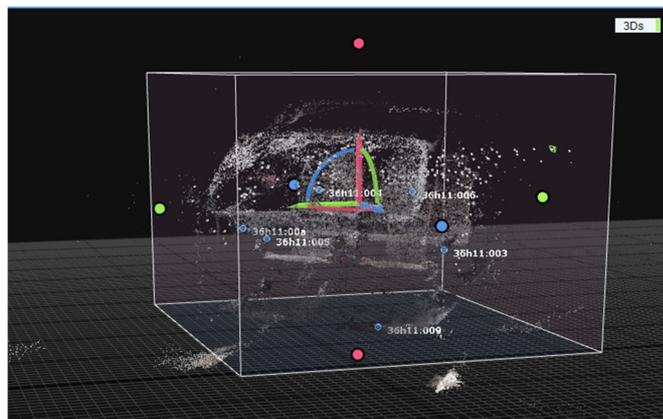


Bild 55: Eingrenzung des Rekonstruktionsbereichs

Konzeption der Versuche

Sobald die Kamerapositionen bekannt sind, kann ein komplettes dichtes 3D-Dreiecksnetz in der gewünschten Qualität erzeugt werden. Die Untersuchungen in Kapitel 5 haben ergeben, dass die Berechnungen mit normalen Details zum besten Ergebnis führen. Die Berechnung in diesem Beispiel dauert circa 20 Minuten. Ein Ausschnitt des Modells ist in Bild 56 zu sehen. [8], [23], [24], [25], [36]



Bild 56: Rekonstruktionsergebnis in normaler Qualität

In der 1D-Ansicht taucht unter der vorher ausgewählten Komponente jetzt das berechnete Modell auf. Es wird angezeigt, wie viele Dreiecke erzeugt wurden (siehe Bild 57).

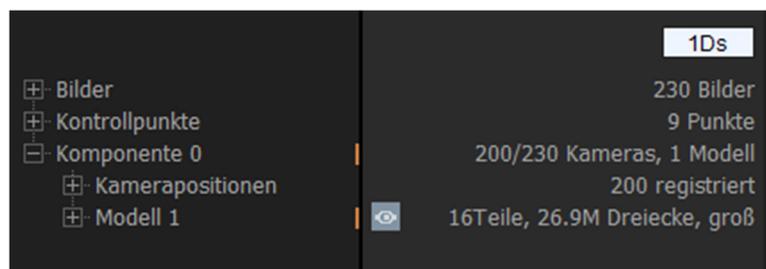


Bild 57: 1D-Ansicht des Modells

Kolorieren

In Bild 56 sieht man das Modell ohne Farbe. Die Szene wird weiß beleuchtet, Risse und Probleme im Dreiecksnetz werden betont. Um das Modell farbig zu machen, wählt man in der Registerkarte „Mesh Modell“ den Button „Kolorieren“ (siehe Bild 58) aus. Dabei kann die Qualität auf Vorschauqualität oder normal eingestellt werden. In diesem Schritt wird eine Farbe für jeden Scheitelpunkt berechnet. Es



wird empfohlen, diesen Vorgang bei dichten Modellen einzusetzen. Diese Methode ist nicht sehr rechenintensiv, es dauert nur wenige Minuten. [36]

Bild 58: Kolorieren-Button

Texturieren

In derselben Registerkarte befindet sich der Button „Texturieren“. Besonders wenn Modelldreiecke zu groß sind, eignet sich dieses Verfahren. Durch das Texturieren werden Modelle qualitativ hochwertiger und realistischer. Besonders für Neulinge ist diese Methode nützlich, um ein solches Modell zu generieren. Es dauert in der Regel nur ein paar Minuten. Das fertige gerechnete Modell ist in Bild 59 zu sehen.

[36]



Bild 59: Texturiertes Modell

Exportieren

Beim Exportieren der Daten gibt es verschiedene Möglichkeiten. Es können beispielsweise Rendering-Modelle oder Modelle im Polygon-Dateiformat exportiert werden. Für den späteren Vergleich der Punktwolken eignet sich das Exportieren im XYZ-Format am besten. [36]

6.3 Laserscanning

Der Innenraum soll neben der in Kapitel 6.2 beschriebenen Methode mit einem Laserscanner erfasst, ausgewertet und daraus eine 3D-Punktwolke erstellt werden.

6.3.1 Equipment

Laserscanner

Beim ausgewählten Laserscanner handelt es sich um den FARO® Freestyle 2 Handscanner, er wird für das Experiment freundlicherweise von der Firma FARO zur Verfügung gestellt. Dieser bietet eine schnelle, fotorealistische 3D-Realitätserfassung und wird neben Unfallstellenvermessung auch bei der Analyse eines Tatorts oder der Dokumentation einer Baustelle eingesetzt. Das praktische an diesem Scannen ist, das er durch eine Person handgeführt verwendet werden kann. Er funktioniert kabellos und hat zudem ein geringes Gewicht. Ein Mobiltelefon kann dabei als Display dienen, indem es magnetisch am Scanner angebracht werden kann, um den gescannten Bereich in Echtzeit zu visualisieren. Der Distanzbereich des Scanners beginnt bei 0,4 m und kann auf maximal 10 m festgelegt werden. Der Scanner soll selbst bei vollständiger Dunkelheit brauchbare Daten bereitstellen. Die erfassten Daten werden auf dem Gerät direkt gespeichert. Die Leistungsspezifikationen können der Anlage 13 entnommen werden. Bild 60 zeigt eine Person mit umgeschnalltem Scanner. [37]

Konzeption der Versuche



Bild 60: Handgeführter FARO Freestyle 2 Scanner

Marker

Wie auch bei der 3D-Photogrammetrie ist es sinnvoll Marker im Versuchswagen zu platzieren, um später in der Modellberechnung ein besseres Ergebnis erzielen zu können. Die für den Scanner geeigneten Marker sind auf ein Schild gedruckt und werden ebenfalls von der Firma FARO bereitgestellt (siehe Bild 61).

Dieselben Marker werden zudem in Papierform ausgeschnitten und im Innenraum des Fahrzeugs gleichmäßig platziert (siehe Bild 62). Diese werden später beim Scannen erkannt und gespeichert.



Bild 61: Schild mit FARO-Markern



Bild 62: FARO-Marker im Fahrzeuginnenraum

Konzeption der Versuche

6.3.2 Software FARO SCENE

Für die Auswertung der Scandaten und Erstellung der 3D-Punktwolken soll die von FARO entwickelte SCENE-Software zum Einsatz kommen. Sie ist speziell für FARO-Scanlösungen, deren Verarbeitung und Verwaltung geeignet. Daten können schnell und einfach in Vollfarbe mit und ohne Passmarken erzeugt werden. Daraus können 3D-Visualisierungen, unterschiedliche Punktwolken und CAD-Formate exportiert werden. Außerdem ist eine Virtual-Reality-Ansicht möglich. Das Datenblatt zur Software ist in Anlage 14 zu finden. [38]

Workflow

Im Folgenden wird das Arbeiten mit dem Programm FARO SCENE genauer beschrieben. Dazu wird die für einen Monat kostenlos zur Verfügung gestellte Vollversion 2021.0 genutzt. Das Programm ist recht einfach zu bedienen und zeigt viele Parallelen zur Software RealityCapture. Die Oberfläche ist in Bild 63 zu sehen.

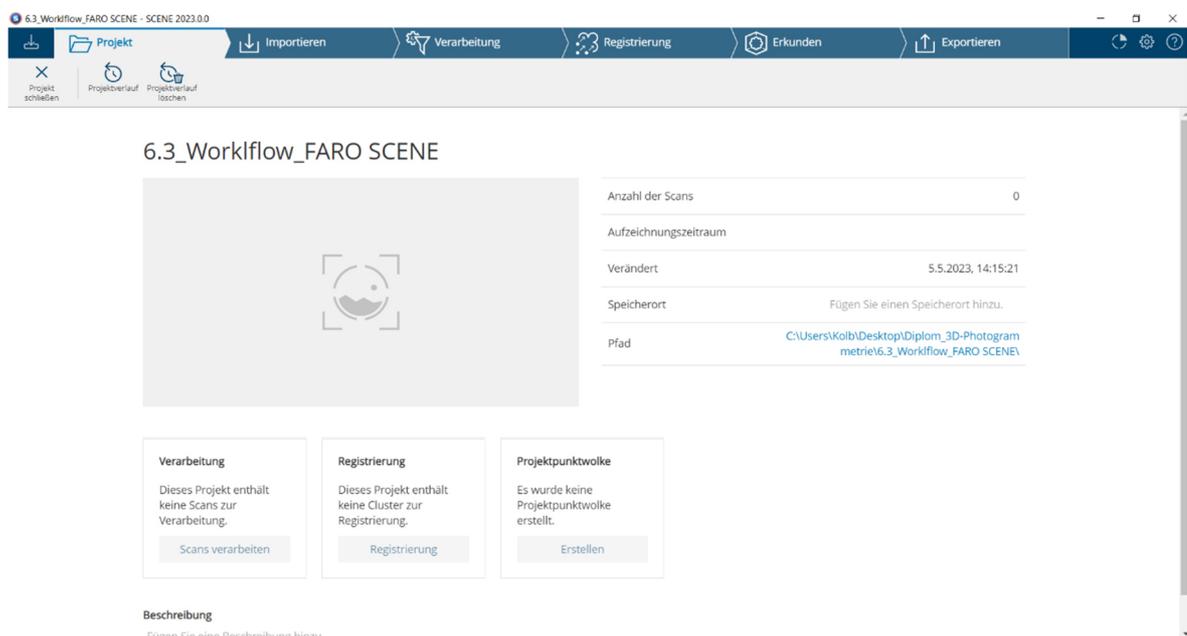


Bild 63: Oberfläche FARO SCENE

Die einzelnen Arbeitsschritte bis zur Erstellung einer 3D-Punktwolke aus einem Scan sind oben an der blauen Leiste in Bild 63 (Projekt- Importieren- Verarbeitung- Registrierung- Erkunden- Exportieren) abgebildet. Zunächst wird ein Projekt erstellt und benannt.

Konzeption der Versuche

Importieren

Zunächst werden Daten importiert. Dies können neben Scans auch zum Beispiel Bilder, Netz-Objekte oder ganze Projekte sein. Das Projekt mit den importierten Daten wird jederzeit links im Strukturbaum angezeigt (siehe Bild 64).

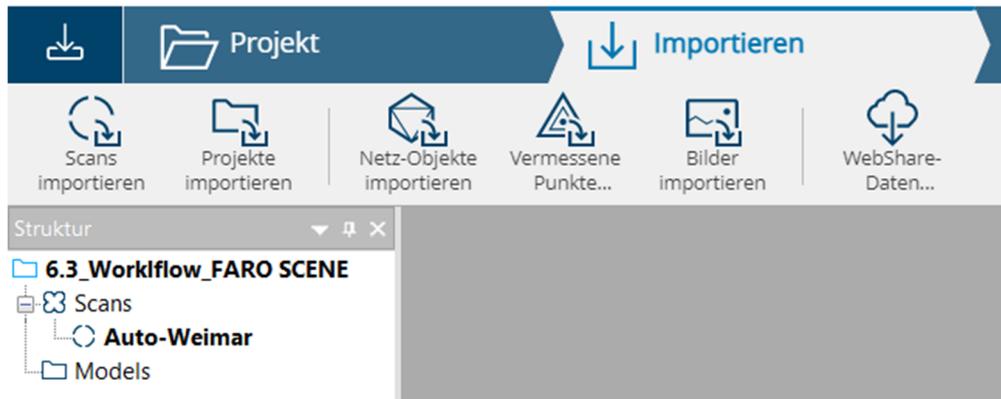


Bild 64: Importieren von Daten in FARO SCENE

Verarbeitung

Beim Drücken des Buttons „Scans verarbeiten“ öffnet sich das Fenster „Scans auswählen“ (siehe Bild 65). Nun können Scans ausgewählt und mit dem grünen Button oben rechts „Verarbeitung konfigurieren“ bestätigt werden.

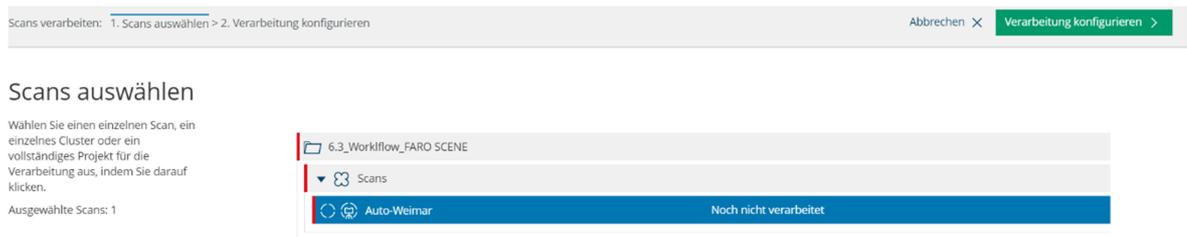


Bild 65: Scans auswählen in FARO SCENE

Nun können einige Einstellungen für die Bearbeitung des Scans gewählt werden (siehe Bild 66 und 67). Es soll eine Scanpunktwolke erstellt und eingefärbt werden. Unter der Schaltfläche „Zielmarken suchen“ (siehe Bild 67) können vor dem Scanvorgang ausgelegte Marker automatisch gesucht werden. Der gesamte Vorgang dauert nur wenige Minuten.

Konzeption der Versuche

Verarbeitung konfigurieren

Die Einstellungen für die Verarbeitung konfigurieren. Die Standardwerte für diese Seite kann in den Einstellungen geändert werden.

Ausgewählte Scans: 1

▼ Allgemein

Vollständig verarbeitete Scans überspringen

Überspringen ist für einzelne Scans nicht verfügbar.

▼ Scanpunktwolken

Scanpunktwolken erstellen

▼ Einfärbung

Keine Einfärbung

Scans einfärben ?

Laser Illuminated HDR ?

▼ Filter

Filter für dunkle Scanpunkte ?

► Einstellungen

Abstandsfilter ?

► Einstellungen

Bild 66: Verarbeitung konfigurieren in FARO SCENE (1)

Verarbeitung konfigurieren

Die Einstellungen für die Verarbeitung konfigurieren. Die Standardwerte für diese Seite kann in den Einstellungen geändert werden.

Ausgewählte Scans: 1

▼ Zielmarken suchen

Schachbretter suchen

Markierungen suchen

Ebenen suchen

Kugeln suchen

Aktive Kugelradien: ?

☰ 0.0695 m × ☰ 0.0994 m × Neu hinzufügen

Inaktive Kugelradien:

Neu hinzufügen

▼ Automatische Registrierung

Automatische Registrierung durchführen

Einzelne Scans können nicht registriert werden.

Bild 67: Verarbeitung konfigurieren in FARO SCENE (2)

Konzeption der Versuche

Registrierung

Bei der Registrierung der Daten können unterschiedliche Schritte gewählt werden. Wie in Bild 68 angezeigt, ist der nächste empfohlene Vorgang die automatische Registrierung des Scans.



Bild 68: Registrierung des Scans in FARO SCENE

Bei der automatischen Registrierung der Daten können verschiedene Methoden gewählt werden. Ein möglicher Schritt ist die Registrierung mittels Cloud-to-Cloud Methode (siehe Bild 69). Dabei werden bei mehreren Scans, die zusammengefügt werden sollen, gleiche Bereiche gefunden und ausgewählt. Eine andere Möglichkeit ist die Methode „Zielmarkenbasiert“ (siehe Bild 70), bei der gleiche Marken in verschiedenen Scans als Orientierung dienen sollen.

Methode auswählen

Ausgewählter Cluster: Scans

Wählen Sie eine Methode zur Registrierung aus.

Cloud-to-Cloud

Methode auswählen

Ausgewählter Cluster: Scans

Wählen Sie eine Methode zur Registrierung aus.

Zielmarkenbasiert

Zielmarken überprüfen ?

Bild 69: Methode "Cloud-to-Cloud" in FARO SCENE (links)

Bild 70: Methode "Zielmarkenbasiert" in FARO SCENE (rechts)

Nach der automatischen Registrierung folgt meist noch eine manuelle Registrierung. Dabei kann zwischen der „Zwei-Punkte-Ausrichtung“ und der „Drei-Punkte-

Konzeption der Versuche

Ausrichtung“ gewählt werden (siehe Bild 71). Bei diesem Vorgang wird das Projektkoordinatensystem ausgerichtet.

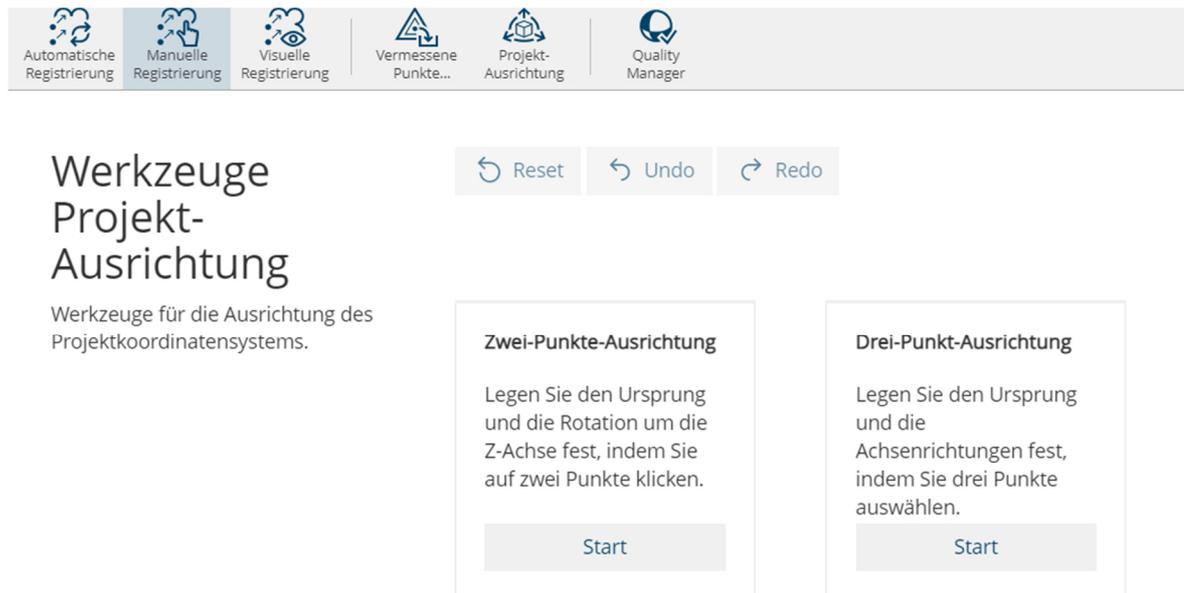


Bild 71: Manuelle Registrierung in FARO SCENE

Bei der „Zwei-Punkte-Ausrichtung“ wird zunächst der Ursprung des Projektkoordinatensystems definiert. Dies ist der Rotationspunkt, um den sich die Z-Achse drehen soll. Außerdem werden zwei Punkte festgelegt, zwischen denen, auf einer Ebene, eine Strecke eingetragen werden kann. Hier wäre es beispielsweise vorstellbar, im Scanbereich ein Lineal zu platzieren, den Ursprung auf das Lineal zu legen und auf diesem zwei Punkte zu wählen, zwischen denen eine Strecke gemessen werden kann. Diese in Wirklichkeit abgetragene Strecke kann dann ins System zur Ausrichtung des Projektkoordinatensystems eingetragen werden.

Erkunden und Erstellung der Projektpunktwolke

Nach der Registrierung der Daten wird der gerechnete Scan visualisiert. Beim Drücken der Schaltfläche „Erkunden“ kann das Modell gedreht und dabei begutachtet werden, ähnlich wie bei RealityCapture. Dabei können verschiedene Ansichten gewählt werden (siehe Bild 72)

Konzeption der Versuche

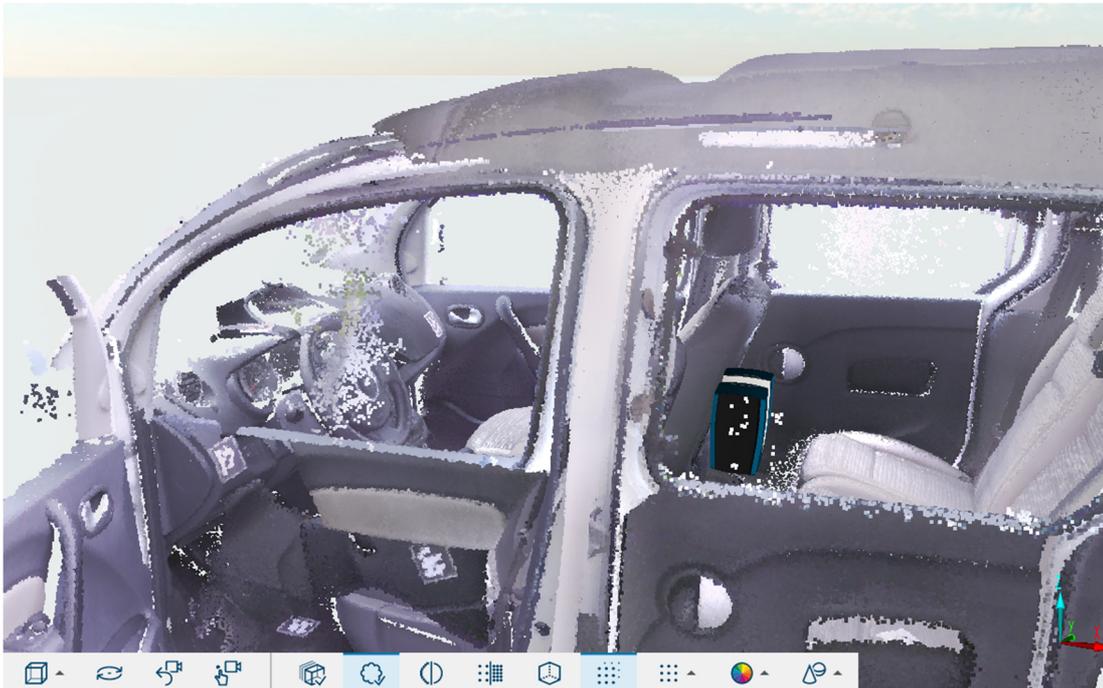


Bild 72: Erkunden des Scans in FARO SCENE

Anschließend kann mit einer sogenannten „Clipping Box“ der Bereich ausgewählt werden, der später als Modell gerechnet werden soll. Auch dieser Vorgang ähnelt dem Vorgang zur Eingrenzung des Rekonstruktionsbereich in RealityCapture sehr stark. Ein Rechteck, wie in Bild 73 zu sehen, definiert diesen Bereich.

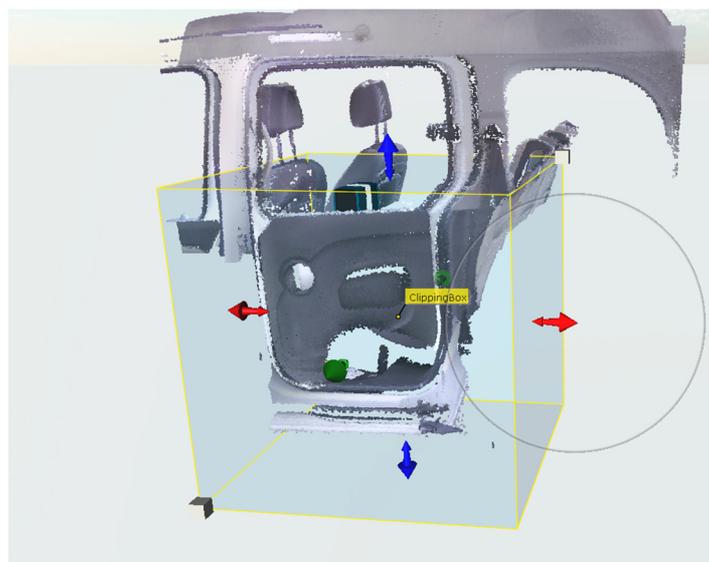
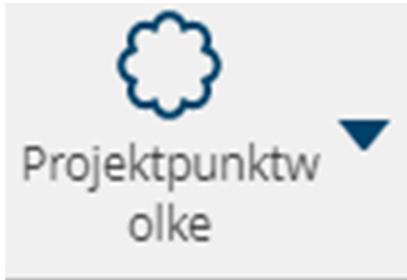


Bild 73: Eingrenzung des Rekonstruktionsbereich mit einer „Clipping Box“ in FARO SCENE

Konzeption der Versuche



Nach der Eingrenzung des Bereichs, kann eine 3D-Punktwolke durch den Button „Projektpunktwolke“ (siehe Bild 74) erstellt werden. Dabei können noch einige Einstellungen, wie zum Beispiel das Entfernen doppelter Objekte, vorgenommen werden.

Bild 74: Projektpunktwolke erstellen in FARO SCENE

Die erstellte 3D-Punktwolke aus Scans ist in Bild 75 zu sehen. Die Berechnung dauert dabei nur wenige Minuten.



Bild 75: Berechnete 3D-Punktwolke in FARO SCENE

6.4 Panoramakamera

Im dritten und letzten Versuch soll der Fahrzeuginnenraum mittels einer Panoramakamera aufgenommen werden. Aus den erzeugten Bildern soll mit der Software RealityCapture eine 3D-Punktwolke erstellt werden.

6.4.1 Equipment

Beim Panoramasytem, welches für die Innenraumaufnahmen eingesetzt werden soll, handelt es sich um den *piXplorer 100* von der Firma CLAUSS (siehe Bild 76).

Konzeption der Versuche

Mithilfe dieser Panoramakamera können in kurzer Aufnahmezeit sehr viele Bilder in 16k.HDR-Qualität vollautomatisch aufgenommen werden. Damit werden vor allem Puppenhausansichten von Innenräumen von Museen realisiert, um VR-Touren durch bestimmte Touren möglich zu machen. Die Aufnahme funktioniert dabei vollautomatisch nach automatischer Kalibrierung der Kamera. Es dreht sich über ein zweiachsiges System und erfasst somit alle Bereiche des Raums. Die technischen Daten sind in Anlage 16 zu finden. [41]



Bild 76: CLAUSS piXplorer 100 [41]

Für die Aufnahmeserie sollen zwei Stative eingesetzt werden, auf denen das Panoramasytem befestigt wird. Für die Aufnahmen aus Fahrer- und Beifahrerperspektive kommt das Horizontalstativ „Slide Boom“ der Firma CLAUSS zum Einsatz (siehe Bild 77). Dieses wird außerhalb des Fahrzeugs platziert und jeweils durch das Fahrer- bzw. Beifahrerfenster geführt. Durch Gewichte unten am Stativ ist eine ruckelfreie Aufnahme gewährleistet. Das Stativ ist zudem höhenverstellbar. [42]

Da sich die hinteren Fenster des Versuchsfahrzeugs nicht vollständig öffnen lassen, wird für die Aufnahmen für die hintere Sitzreihe ein Panoramastativ der Firma CLAUSS eingesetzt (siehe Bild 78). Dieses wird in der Mitte am Boden vor der hinteren Sitzreihe platziert und trägt das vorher beschriebene Panoramasytem.

Vorbereitung und Durchführung der Versuche



Bild 77: Horizontalstativ „Slide Boom“ von CLAUSS (links) [42]

Bild 78: Panoramastativ der Firma CLAUSS (rechts) [43]

6.4.2 Versuchsplan

Nach der automatisch erfolgten Aufnahme mit dem Panoramasytem piXplorer 100 und dem Horizontalstativ für den vorderen Innenraum, sowie dem hinteren Bereich mit dem Panoramastativ, soll die Verarbeitung der Daten ebenfalls mit RealityCapture durchgeführt werden. Wie in Kapitel 6.2.3 beschrieben, soll mithilfe der aufgenommenen Bilder eine 3D-Punktwolke erzeugt werden.

7 Vorbereitung und Durchführung der Versuche

Alle drei Versuche werden an einem Tag auf dem Hof der Firma CLAUSS in Zwönitz durchgeführt. Das Wetter ist an diesem Tag bewölkt, leicht neblig und es fällt leicht Schnee bei -4° C. Somit herrschen gute Bedingungen, da direkte Sonneneinstrahlung ausgeschlossen ist.

7.1 3D-Photogrammetrie

Bevor das Fotografieren beginnen kann, werden zuerst die in Kapitel 6.2 beschriebenen Marker in Papierform ausgeschnitten und mit doppelseitigem Klebeband gleichmäßig im Fahrzeuginnenraum verteilt (siehe Bild 80 in Kapitel 7.2).

Vorbereitung und Durchführung der Versuche

Die Fotos werden zum Teil von außen, durch die geöffneten Türen, aber auch von innen erstellt. Dabei wird nach jedem Foto die Position der Kamera leicht verändert. Die in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Hilfestellungen werden dabei bestmöglich beachtet. Die Aufnahmen werden mit den beiden Objektiven mit 16mm- bzw. 10mm-Brennweiten gemacht. Die aufgenommenen Fotos werden im JPG- und RAW-Format gespeichert. Der Fotografie Vorgang dauert etwa 15 Minuten.

7.2 Laserscanning

Für die Aufnahmen mit dem Laserscanner werden zunächst die runden Marker im Fahrzeuginnenraum verteilt. Bild 79 zeigt das Interieur mit allen ausgelegten Zielmarkern. Die Runden sind für das Laserscanning vorgesehen, die Eckigen für das Verfahren zur 3D-Photogrammetrie sowie für die Aufnahmen mit dem Panoramasystem (siehe Bild 79).



Bild 79: Im Fahrzeuginnenraum verteilte Marker

Das Schild, auf dem die gleichen runden Marker gedruckt sind, wird vor die Fahrertür gelegt. Mit dem Erfassen dieses Schildes, soll der Scanvorgang beginnen und enden (siehe Bild 80).

Vorbereitung und Durchführung der Versuche



Bild 80: Schild mit Markern vor dem Fahrzeug

Da für den Scanner eine Betriebstemperatur von mindestens 18°C empfohlen wird, wird das Gerät etwa zehn Minuten vor der Aufnahme gestartet. Der Handscanner wird durch das in Bild 80 dargestellte Schild automatisch kalibriert, indem dieses erfasst wird. Zur direkten Visualisierung des Scans wird ein Smartphone direkt am Gerät magnetisch befestigt. Im Display wird unter anderem angezeigt, wenn sich der Scan zu nah oder zu weit weg vom zu scannenden Objekt befindet und der Abstand kann direkt korrigiert werden. Insgesamt werden zwei Scans erstellt. Beim ersten Scanvorgang wird von außen durch die geöffnete Fahrertür und die linke hintere Tür in einem Zug der Innenraum erfasst (siehe Bild 81). Dabei wird das Gerät gleichmäßig geführt, die Beifahrertür ist geschlossen. Der Scan beginnt mit dem Schild, welches zuvor vor der Fahrertür platziert wurde. Die im Innenraum verteilten Marker werden während des Vorgangs vom Gerät erkannt und direkt auf dem Display angezeigt. Derselbe Vorgang wird auf der Beifahrerseite durchgeführt. Diesmal ist die Fahrertür und die linke hintere Tür geschlossen und der Scanner wird durch die geöffnete Beifahrertür und die hintere rechte Tür geführt. Insgesamt dauern die beiden Scanaufnahmen nur jeweils ca. eine Minute. Es werden pro Scan ungefähr 1600 Fotos gemacht. Dabei ist festzuhalten, dass ein zu langer Scanvorgang kein genaueres Ergebnis liefern würde, die zu verarbeitende Datenmenge wäre jedoch deutlich größer.

Vorbereitung und Durchführung der Versuche



Bild 81: Scanvorgang durch die geöffnete Fahrertür

7.3 Panoramakamera

Für den Versuch für die Innenraumerfassung mittels Panoramasytem werden zuerst Aufnahmen des vorderen Bereichs des Fahrzeugs gemacht. Das Kamerasystem wird am Horizontalstativ (siehe Kapitel 6.4) befestigt und durch das geöffnete Fenster des Fahrers von außen geführt (siehe Bild 82). Das System kalibriert sich automatisch und erstellt in ca. fünf Minuten ungefähr 400 Fotos mit 20 mm Brennweite. Die Kamera dreht sich über ein zweiachsiges System nach jedem geschossenen Bild automatisch. Dabei sind alle Türen des Fahrzeugs geschlossen.



Bild 82: Durch das Fahrertürfenster geführtes Panoramasytem

Vorbereitung und Durchführung der Versuche

Derselbe Vorgang wird durch das geöffnete Fenster der Tür des Beifahrers durchgeführt (siehe Bild 83). Es werden in ungefähr fünf Minuten ca. 400 Bilder erstellt.



Bild 83: Durch die Beifahrertür geführtes Panoramasystem

Da sich die hinteren Fenster des Versuchsfahrzeugs nicht öffnen lassen und das von außen eingeführte Stativ somit nicht eingesetzt werden kann, wird ein Panoramastativ verwendet. Dieses wird in der Mitte der hinteren Sitzreihe am Boden befestigt und die Kamera darauf angebracht (siehe Bild 84). In fünf Minuten automatischen Fotografierens werden ungefähr 400 Bilder erzeugt.



Bild 84: Panoramastativ auf Panoramastativ im hinteren Fahrzeugbereich

8 Auswertung der Versuche

8.1 3D-Photogrammetrie

Die Auswertung der aufgenommenen Bilderserien erfolgt, wie bereits beschrieben, mit der Software RealityCapture. Dies wird durch Herrn Prof. Dr. Brösdorf wie im Verfahren aus Kapitel 6.2.3 durchgeführt und als XYZ-Datei exportiert. Ein Überblick des Ergebnisses ist in Bild 85 zu sehen. Auf den ersten Blick sieht das Ergebnis sehr gut, einzelne Bereiche sogar fast realistisch aus.



Bild 85: Erstellte Punktwolke zum Versuch der 3D-Photogrammetrie

Weitere 3D-Punktwolken werden in Folge mit der Software „CloudCompare“ (siehe weiter unten) betrachtet.

CloudCompare

Die Software CloudCompare ist ein kostenloses, für jeden zugängliches 3D-Programm, mit dem Punktwolken, dreieckige Netze und kalibrierte Bilder verarbeitet werden können. Die Software soll zur Auswertung und zum Vergleichen der erstellten 3D-Punktwolken, ähnlich wie in der Arbeit von Herrn HELBIG [24], verwendet werden. [44], [45]

Detailaufnahmen sind in der Bildserie 86 zu sehen. Es fällt auf, dass matte Oberflächen, wie bei den Sitzen oder in der I-Tafel sehr detailreich dargestellt

Auswertung der Versuche

werden können. Die Farben wirken sehr kräftig und realitätsnah. Es gibt Löcher im Bereich der I-Tafel, obwohl dort überwiegend matte Oberflächen zu sehen sind. Möglicherweise wurde dieser Bereich nicht richtig ausgeleuchtet oder unzureichend fotografiert. Die größten Unzulänglichkeiten treten bei diffusen und reflektierenden Oberflächen, wie an den Scheiben und Tacho-bzw. Displayanzeigen auf. Die Frontscheibe erscheint weiß, beim Display des Infotainmentsystems und der Tachoanzeige kommt es zu Löchern. Um das Ergebnis zu verbessern hätten diese Bereiche abgeklebt oder mit Sprays bearbeitet werden müssen. Auch eine größere Anzahl der aufzunehmenden Bilder könnte hier Verbesserungen bringen. Insgesamt ist das Ergebnis sehr gut, jedoch teilweise löchrig und dadurch nicht ganz vollständig.



Bild 86: Aufnahmeserie zum Ergebnis des Versuchs zur 3D-Photogrammetrie

8.2 Laserscanning

Die Laserscanning Aufnahmen werden direkt vor Ort nach der Versuchsdurchführung durch Herrn Skoruppa, Mitarbeiter der Firma FARO, ausgewertet. Dazu wird die von FARO entwickelte Software SCENE verwendet und nach dem in Kapitel 6.3.2 beschriebenen Verfahren durchgeführt. Dazu werden zunächst die beiden Scans mit jeweils 1688 bzw. 1661 Bildern automatisch verarbeitet. Dieser Vorgang dauert nur etwa 150 Sekunden. Anschließend werden die Scans manuell weiterverarbeitet. Bei der Registrierung des Projekts und der Zusammenlegung der Scans wird das Verfahren „Zielmarkenbasiert“ (siehe Kapitel 6.3.2 Bild 70) angewendet. Die durchschnittliche Abweichung beträgt hier 3,3 mm. Beim Versuch der Zusammenlegung der Scans mit dem Verfahren „Cloud-to-Cloud“ (siehe Kapitel 6.3.2 Bild 69) beträgt die durchschnittliche Abweichung 4,0 mm. Daher werden die Daten, die mit dem Verfahren „Zielmarkenbasiert“ ausgewertet werden, verwendet. Der zusammengelegte Scan wird über die „2-Punkte-Ausrichtung“ (siehe Kapitel 6.3.2 Bild 71) ausgerichtet. Dazu werden zwei Punkte am Schild mit aufgedruckten Markern ausgewählt und der Abstand der beiden Punkte im Programm eingetragen. Anschließend wird eine Projektpunktwolke erstellt, wobei doppelte Punkte automatisch erstellt werden sollen. Über eine Klippebene wird der Bereich eingegrenzt. Abschließend wird ein Mesh (Netz) erstellt und im e57-Format exportiert. Dabei wird die größtmögliche Polygonnetzzahl, nämlich 375000, eingestellt.

Das Ergebnis wird in der Bilderserie 87 gezeigt. Der gesamte Innenraum wurde beim Scannen erfasst, es fällt jedoch auf, dass das Polygonnetz deutlich weniger Dreiecke darstellt und dadurch das Modell deutlich transparenter wirkt. Dies liegt an der Limitierung durch die eingesetzte Software FARO SCENE. Mithilfe von RealityCapture, was ebenfalls Laserscans verarbeiten kann, kann möglicherweise ein besseres Ergebnis erzielt werden. Es gibt einige Lücken, vor allem im Bereich von reflektierenden und diffusen Oberflächen und die Farbgebung wirkt nicht so kräftig. Insbesondere der Bereich von den Armaturen nach vorne weiter bis zur Frontscheibe wird nahezu nicht dargestellt, obwohl es sich hierbei um dunkle, matte Flächen handelt. Dennoch ist das Ergebnis zufriedenstellend und für einige Anwendungsbereiche ausreichend.



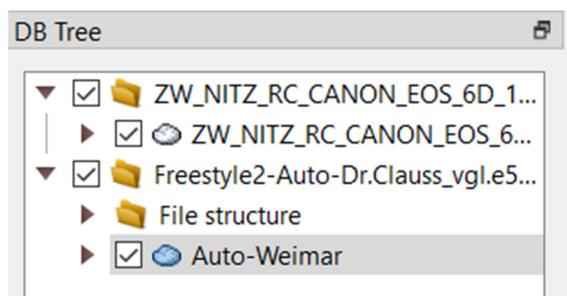
Bild 87: Aufnahmeserie zum Ergebnis des Versuchs zum Laserscanning

8.3 Panoramakamera

Leider wurden zur Auswertung des Versuchs zu Verfahren mit einem Panoramasytem seitens Herrn Clauss von der gleichnamigen Firma CLAUSS keine Daten geliefert. Ein Ergebnis bleibt somit leider aus.

8.4 Vergleichende Betrachtung zu den angewandten Verfahren

Zum Vergleich der beiden Punktwolken wird das Verfahren mittels CloudCompare angewandt, welches Herr Helbig [20] bereits in seiner Arbeit beschrieb. Dabei werden die beiden erstellten Punktwolken kopiert, translatiert, ausgerichtet und übereinandergelegt, um diese miteinander vergleichen zu können. Dazu werden zuerst die Punktwolken kopiert und in das Fenster des Programms eingefügt. Dadurch behält man die originalen Modelle bei und muss diese nicht zum Vergleichen verändern und anpassen. Im Datenbasis-Baum (DB-Tree) erscheinen die beiden Punktwolken (siehe Bild 88).



Der obere Ordner enthält die Punktwolke des Verfahrens der 3D-Photogrammetrie, der untere das Modell des Laserscannings. Die auszurichtende Punktwolke (hier die des Laserscannings) wird angewählt und

Bild 88: Datenbasisbaum in CloudCompare

mit dem Button „Scale/Multiply“ grob auf die gewünschte Größe skaliert, weil das Modell deutlich kleiner ist als das der 3D-Photogrammetrie (siehe Bild 89).

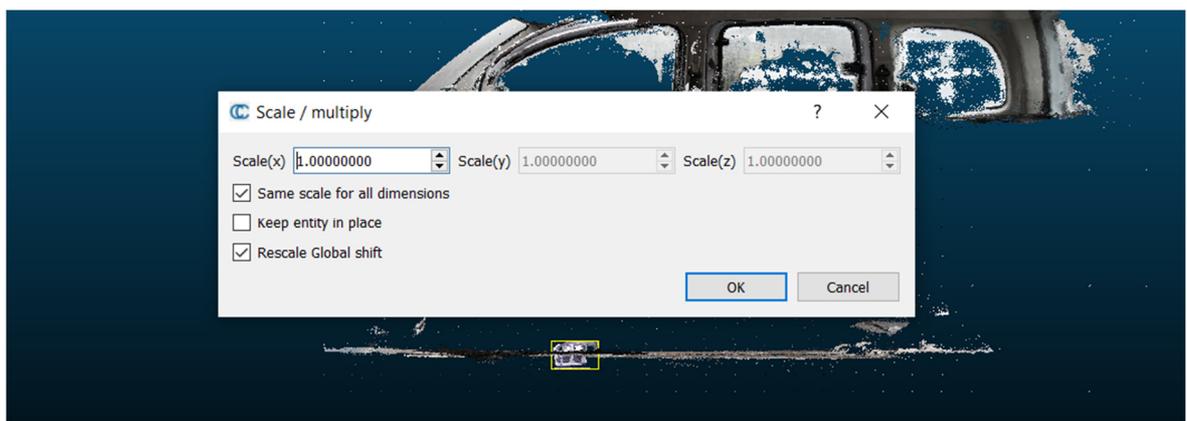


Bild 89: Funktion „Scale/Multiply“ in CloudCompare

Hier wird ein Skalierungswert festgelegt, um das Modell grob in die gewünschte Größe zu bringen. Anschließend wird dieses mit der Funktion „Translate, Rotate“

Auswertung der Versuche

grob in die Lage der Referenzpunktewolke gebracht, damit diese übereinander liegen (siehe Bild 90).



Bild 90: Ausrichten der Punktwolke mit der Funktion „Translate, Rotate“

Nun werden beide Punktwolken mit gedrückter Steuerungstaste (STRG) angewählt und die Funktion „Alignment“ ausgewählt, um die Punktwolken genauer auszurichten. Die auszurichtende Punktwolke wird ausgewählt. Im erscheinenden Fenster sollen mindestens vier markante Punkte wechselseitig in den Punktwolken gewählt werden. Hier werden die Mittelpunkte der runden Marker ausgewählt, sodass jeweils sieben Punkte für jede Punktwolke definiert werden (siehe Bild 91).

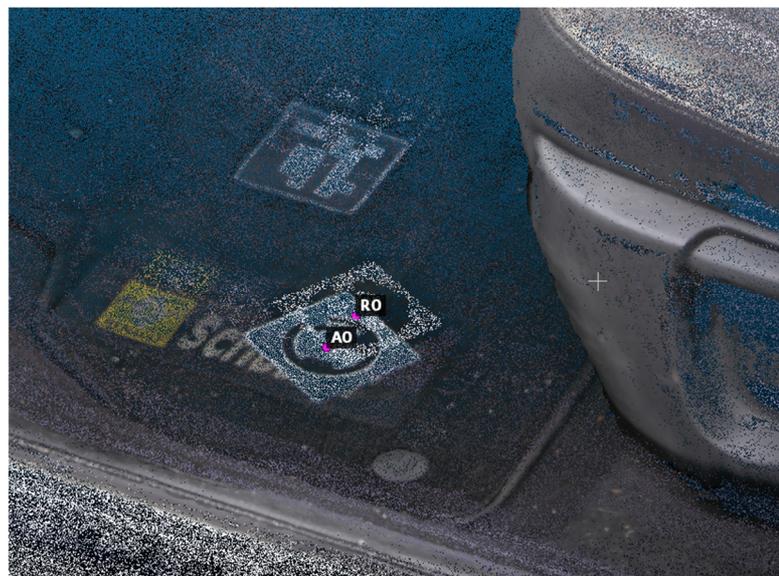


Bild 91: Wechselseitiges Auswählen der markanten Punkte in den Punktwolken

Nach der Ausrichtung können mit einem auf „compute cloud/cloud distance“ die Entfernungen und Abweichungen der beiden Punktwolken berechnet werden. Die Entfernungen werden in einer Farbskala angezeigt (siehe Bild 92).

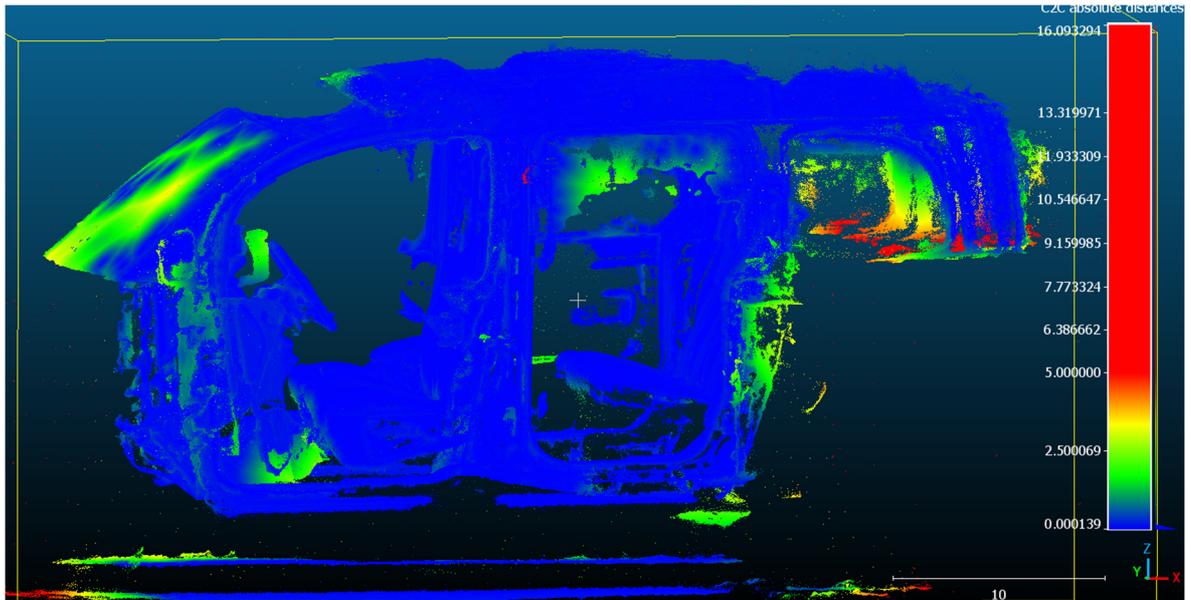


Bild 92: Abweichungen der Punktwolken in einer Farbskala

Die voreingestellte Farbskala erscheint von blau (gut) über grün, gelb bis rot (schlecht). Der rote Bereich beginnt ab einer Abweichung von 5 mm. Der größte Bereich des Ergebnisses befindet sich im blauen Bereich. Im Bereich der Frontscheibe und an den Enden der Scans gibt es grüne Stellen mit einer Abweichung von durchschnittlich 2,5 mm. Einzig im Kofferraumbereich ist der Scan gelb und rot. Dieser Bereich wurde jedoch schon beim Fotografieren und Scannen nicht genau erfasst und ist für das Ergebnis der Experimente irrelevant. Insgesamt treten im überwiegenden Bereich keine Abweichungen auf, der Teil mit den meisten Fehlern sind liegt bei ungefähr 2,5 mm, nur vereinzelt treten Abweichungen von mehr als 5 mm auf. Diese sind im erstellten Histogramm in Bild 92 genauer zu sehen, die Abweichungen sind in der X-Achse unter „C2C absolute distances“ abzulesen. Beide Punktwolken sind somit in den für das Experiment wichtigen Bereichen nahezu gleich, das Ergebnis beider Punktwolken ist sehr positiv zu bewerten.

Auswertung der Versuche

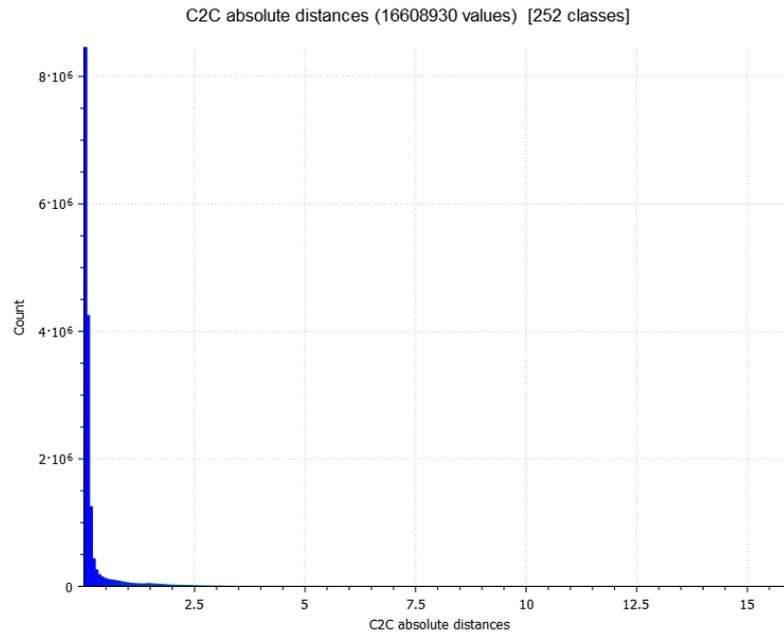


Bild 93: Histogramm der absoluten Distanzfehler der Punktwolken

Optisch sieht die Punktwolke des Verfahrens mit 3D-Photogrammetrie deutlich besser aus als die des Laserscannings. Insbesondere der Bereich der oberen I-Tafel bis zur Frontscheibe wird bei der 3D-Photogrammetrie viel besser dargestellt, beim Laserscanning ist dies lückenhaft. Displays am Tacho und Infotainmentsystem werden bei beiden Modellen nicht angezeigt, da es hier zu großen Reflexionen kommt. Die Punktwolke des Laserscannings wirkt im Vergleich viel transparenter, die Farben der Punktwolke der 3D-Photogrammetrie wirken kräftiger. Das liegt vor allem daran, dass zur Erstellung der Punktwolken bei der 3D-Photogrammetrie mehr Punkte erzeugt wurden. Beim Laserscanning sind es insgesamt 10.079.668 Punkte, bei der 3D-Photogrammetrie 16.373.557 Punkte, was gut 60 % mehr ist. Die Limitierung der Punkte der Wolke des Laserscannings liegt an der eingesetzten Software FARO SCENE. RealityCapture kann ebenfalls Laserscanning-Aufnahmen bearbeiten. Hier könnten in künftigen Untersuchungen Modelle mit der Software RealityCapture erstellt werden. Eventuell können dadurch bessere Ergebnisse erzielt werden.

Das Verfahren des Laserscannings punktet vor allem in der Schnelligkeit der Aufnahmen-Erstellung. Der Innenraum wurde innerhalb von circa drei Minuten vollständig erfasst. Durch die Visualisierung mit einem verbundenen Smartphone oder ähnlichem sieht der Bediener, welche Bereiche bereits erfasst worden sind.

Vergleichende Betrachtung der Versuchsergebnisse zur Literatur

Dadurch ist das Scannen für einen Laien womöglich leichter als das „richtige“ Fotografieren bei der 3D-Photogrammetrie. Auch die Modellerstellung mit der Software FARO SCENE geht sehr schnell und einfach. Wirtschaftlich ist zu sagen, dass die Anschaffungskosten für einen Laserscanner deutlich höher sind als die einer Spiegelreflexkamera. Der eingesetzte Scanner kostet 18300 € [46], die Kamera mit den beiden Objektiven 3.205,44 €. [39], [48], [49] Man kann den Scanner auch für 160 € am Tag und die Software FARO SCENE für 290 € pro Woche mieten. [47] Trotzdem ist das Verfahren der 3D-Photogrammetrie deutlich kostengünstiger und das Ergebnis ist besser.

9 Vergleichende Betrachtungen der Versuchsergebnisse zur Literatur

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse dieser Diplomarbeit mit der von Herrn Pfeiffer [8] aus Kapitel 5.1 verglichen werden. Aus dieser Arbeit werden die Ergebnisse aus dem Verfahren der 3D-Photogrammetrie herangezogen, da sich diese als die besten herausgestellt haben. Es gestaltet sich als schwierig, die Ergebnisse von photogrammetrischen Modellen von verschiedenen Innenräumen miteinander zu vergleichen. Außerdem wurde bei der Rekonstruktion von Herrn Pfeiffer ein deutlich kleinerer Bereich (ohne die hintere Sitzreihe) berücksichtigt. Die Undeutlichkeiten treten bei Herrn Pfeiffer am Lenkrad und Schaltknäuf, in dieser Arbeit bei den Displays und der I-Tafel auf. Der obere Bereich und die Sitze werden in dieser Diplomarbeit besser rekonstruiert, die Anzeige für Geschwindigkeit und Drehzahl bei Herrn Pfeiffer. Dies könnte daran liegen, dass die Scheibe vor der Anzeige bei diesem Versuch mehr spiegelt. Bei künftigen Untersuchungen könnten diese, ähnlich wie in der Studienarbeit von Herrn Richter [23], mit Sprays bearbeitet werden. Es wurde bei der Aufnahme zudem beachtet, dass die Türen verschlossen sind, wenn diese fotografiert werden. Die Armaturen waren ggf. nicht gut genug ausgeleuchtet. Hier könnte in Zukunft bei dunkler Witterung eine gleichmäßig ausleuchtende Lampe zum Einsatz kommen. Insgesamt wurden 230 Bilder zur Modellerstellung verwendet, mehr als die von Herrn Pfeiffer empfohlenen 200. Da jedoch ein größerer Rekonstruktionsbereich gewählt wurde, muss diese Anzahl der Bilder eventuell noch weiter erhöht werden. Grundsätzlich ist das Ergebnis des

Zusammenfassung und Ausblick

Verfahrens der 3D-Photogrammetrie dieser Diplomarbeit mindestens genauso gut, wie das beste Ergebnis von Herrn Pfeiffer. Die in seiner Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und die seitdem gewonnenen Erfahrungen haben dies deutlich begünstigt und den gesamten Prozess vereinfacht.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit dient als Fortsetzung der Diplomarbeit von Herrn Pfeiffer [8]. Es soll ein Fahrzeuginnenraum mittels 3D-Photogrammetrie und Laserscanning zum Vergleich, bestmöglich modelliert werden. Dazu wird zunächst ein Einblick in die Unfallaufnahme und Unfallrekonstruktion, von der Unfallaufnahme über Beweissicherung, fotografischer Dokumentation, der Vermessung von Unfallstelle und Spurenlage, Sicht des Fahrers, bis hin zur Unfallrekonstruktion und Gutachtenerstellung, gegeben. Anschließend werden die Grundlagen der Photogrammetrie in Kapitel drei erläutert. Dies führt von der geschichtlichen Entwicklung, über Anwendungsbereiche, Definition und Prozesse der Photogrammetrie, mathematischen Grundlagen bis zur Anwendung in der Verkehrsunfallrekonstruktion. In Kapitel vier wird das Verfahren und die Anwendung in der Verkehrsunfallrekonstruktion des Laserscannings beschrieben. Es folgt in Kapitel fünf ein Literaturstudium, wobei bereits durchgeführte Untersuchungen kritisch gewürdigt werden. In Kapitel sechs werden Versuche zur Modellierung eines Fahrzeuginnenraums konzipiert. Dabei wird das Messfahrzeug vorgestellt und die Versuche zur 3D-Photogrammetrie, Laserscanning und Panoramakamera geplant. Der Workflow der eingesetzten Softwares RealityCapture und FARO SCENE wird aufgezeigt. Kapitel sieben dreht sich um die Vorbereitung und Durchführung der Versuche auf dem Hof der Firma CLAUSS in Zwönitz. Da zum Versuch mit der Panoramakamera keine Daten vorliegen, werden in Kapitel acht die Versuche zur 3D-Photogrammetrie und Laserscanning ausgewertet und miteinander mit der Software CloudCompare verglichen. Im neunten Kapitel werden die Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der in Kapitel fünf beschriebenen Literatur verglichen.

Die Untersuchungen zeigen, dass sowohl das Modell der 3D-Photogrammetrie als auch das des Laserscannings gute Ergebnisse erbringen. Bei beiden Verfahren wird

Zusammenfassung und Ausblick

der gesamte Innenraum, mit Ausnahme des Kofferraumbereichs, rekonstruiert. Bei der 3D-Photogrammetrie werden matte Oberflächen, wie bei der I-Tafel und den Sitzen sehr detailreich dargestellt. Die größten Fehler treten bei diffusen und reflektierenden Oberflächen, wie den Displays und den Scheiben, auf. Das Modell des Laserscannings wirkt im Vergleich deutlich transparenter, die Farben nicht so kräftig. Vor allem der obere Bereich der I-Tafel wird nahezu nicht dargestellt, obwohl hier keine Spiegelungen auftreten.

Eine vergleichende Betrachtung der beiden Punktwolken in CloudCompare nach Ausrichtung und Registrierung zeigt, dass zwischen den Punktwolken Abweichungen von durchschnittlich 2,5 mm auftreten. Sie sind maßlich somit nahezu identisch.

Die Punktwolke der 3D-Photogrammetrie sieht optisch deutlich besser aus als die des Laserscannings, was vor allem daran liegt, dass das Modell der 3D-Photogrammetrie aus gut 60% mehr Punkten besteht. Die Limitierung der Punktzahl bei der Punktwolke des Laserscannings liegt an der eingesetzten Software FARO SCENE. Bei künftigen Untersuchungen mit Laserscans könnten diese ebenfalls mit RealityCapture bearbeitet werden. Möglicherweise steigt dadurch die Qualität des Modells.

Das Verfahren des Laserscannings punktet vor allem bei der einfachen Bedienbarkeit des Scanners und der unkomplizierten Scannerstellung mit Visualisierung in Echtzeit. Zudem dauert der Vorgang nur wenige Minuten und könnte bei Unfällen, wo höchste Schnelligkeit der Bildaufnahmen gefordert ist, nützlich sein.

Neben der besseren Modellqualität ist auch wirtschaftlich festzuhalten, dass die 3D-Photogrammetrie deutlich kostengünstiger als das Laserscanning ist.

Es wäre interessant zu untersuchen, wie sich die Punktwolke, erstellt aus den Aufnahmen der Panoramakamera, im Vergleich schlägt. Möglicherweise kann dies bei künftigen Arbeiten noch untersucht werden.

Vom Fotografieren bis zur Erstellung des Modells in RealityCapture wurden alle Hilfestellungen aus der Diplomarbeit von Herrn Pfeiffer [8] berücksichtigt. Diese

Zusammenfassung und Ausblick

Erkenntnisse erwiesen sich als sehr hilfreich, wodurch ein sehr gutes Ergebnis erzielt werden konnte. Verglichen mit den Ergebnissen der Untersuchungen von Herrn Pfeiffer [8] fällt auf, dass zum einen der Rekonstruktionsbereich in dieser Arbeit deutlich größer gewählt wurde und einige Bereiche besser abgebildet werden. Displayanzeigen und Teile der I-Tafel werden dagegen schlechter

rekonstruiert. Dies könnte an einer höheren Spiegelung der Displays und Scheiben liegen und einer dunkleren Belichtung, wodurch sich in Teilen der Armaturen kleine Löcher bilden. Hier könnte eine gleichmäßig ausleuchtende Lampe oder helleres Wetter, jedoch kein direkter Sonnenschein, Abhilfe schaffen. Scheiben und Display könnten vor der Aufnahme abgeklebt oder mit Sprays behandelt werden, ähnlich wie in der Studienarbeit von Herrn Richter [23]. Zwar wurde die Empfehlung von Herrn Pfeiffer [8] eingehalten, mindestens 200 Aufnahmen für den Innenraum zu erstellen, jedoch wurde in dieser Arbeit der Rekonstruktionsbereich vergrößert, was möglicherweise zur Folge hat, dass die Bildanzahl noch weiter erhöht werden muss. Insgesamt ist die Modellerstellung eines Fahrzeuginnenraums mittels 3D-Photogrammetrie bestens gelungen. Das Modell wäre für die Dokumentation des Interieurs in der Unfallrekonstruktion bestens geeignet.

11 Literatur

- [1] <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Tabellen/unfaelle-verunglueckte-.html>, Zugriff 17.05.2023 15:00
- [2] <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Tabellen/liste-strassenverkehrsunfaelle.html>, Zugriff 17.05.2023 15:00
- [3] <https://www.gdv.de/gdv/medien/zahlen-und-daten/kfz-versicherung-beitraege-leistungen-und-anzahl-der-risiken>, Zugriff 17.05.2023 15:15
- [4] <https://unfallanalyse.hamburg/index.php/ifu-lexikon/betrug/statistik/>, Zugriff 17.05.2023 15:30
- [5] Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion Grundlagen der Unfallaufklärung, Johannsen Heiko, Berlin 2013, Springer Verlag, 3. Auflage
- [6] Unfallaufnahme und Datenerhebung (Abschnitt A02) Bredl Alois, Brösdorf, Klaus-Dieter, Burg Jürgen, Moser Andreas In: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, Burg Heinz, Moser Andreas, 2017, 3. Auflage
- [7] <https://ffw-elzach.de/einsatzberichte/th-3-verkehrsunfall-mit-eingeklemmten-personen/>, Zugriff: 08.02.2023 15:00
- [8] Modellierung von Fahrzeuginnenräumen mittels 3D-Photogrammetrie, Pfeiffer Philipp, 2020. Diplomarbeit
- [9] Fotogrammetrie Band 1, Kraus Karl, Berlin 2004, Dümmler Verlag, 7. Auflage
- [10] Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen Methoden Beispiele, Luhmann Thomas, Wichmann Verlag, Berlin 2018, 4. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage
- [11] <https://www.autodesk.de/solutions/photogrammetry-software#:~:text=Was%20ist%20Photogrammetrie%3F,Zeichnungen%20oder%203D%2DModelle%20umgewandelt.>, Zugriff: 10.02.2023 17:30
- [12] https://www.dgpf.de/pfg/2009/pfg2009_6_Albertz.pdf, 100 Jahre Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformationen e.V. Albertz Jörg, 2009, Zugriff 25.02.2023 16:11
- [13] Industriephotogrammetrie, Luhmann Thomas, Maas Hans-Gerd (Kapitel 1, Seite 106-153) aus: Photogrammetrie und Fernerkundung Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel , Heipke Christian, Hannover 2017, Springer Verlag, 1. Auflage

Literatur

- [14] <https://www.pixolum.com/blog/fotografie/verzeichnung-perspektivisch-optisch>, Zugriff: 20.06.2023 21:00
- [15] Photogrammetrie und Fernerkundung - eine Einführung, Heipke Christian (Kapitel 2, Seite 2-23) aus: Photogrammetrie und Fernerkundung Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel, Heipke Christian, Hannover 2017, Springer Verlag, 1. Auflage
- [16] Laserscanning, Pfeifer Norbert, Mandlbürger Gottfried, Glira Philipp (Kapitel 13, Seite 432-479) aus: Photogrammetrie und Fernerkundung Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel, Heipke Christian, Hannover 2017, Springer Verlag, 1. Auflage
- [17] Aktive Fernerkundungssensorik – Technologische Grundlagen und Abbildungsgeometrie, Jutzi Boris, Meyer Franz J., Hinz Stefan (Kapitel 3, Seite 66-102) aus: Photogrammetrie und Fernerkundung Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel, Heipke Christian, Hannover 2017, Springer Verlag, 1. Auflage
- [18] <https://www.shutterstock.com/de/search/tachymeterktorgrafiken> | Shutterstock, Zugriff 22.04.2023 15:00
- [19] 3-D-Photogrammetrie in der Unfallrekonstruktion, Brösdorf Klaus-Dieter, Görtz Marco, Kubjatko Tibor, 2014, <https://www.vkuonline.de/>
- [20] <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/g/georeferenzierte-daten.html#:~:text=Unter%20dem%20Vorgang%20der%20Georeferenzierung,kartografie%2C%20Fernerkundung%20und%20bei%20Geoinformationssystemen.>, Zugriff: 26-04.2023 17:00
- [21] 3-D-Vermessung von Unfallstellen Teil 2, Holzner Markus, Nabe Michael, Deppe Wilhelm, <https://www.vkuonline.de/>
- [22] <https://www.faro.com/de-DE/Resource-Library/Brochure/FARO-Focus-Premium>, Zugriff: 28.04.2023 09:00
- [23] Modellierung von Fahrzeuginnenräumen mittels 3D-Photogrammetrie, Richter Philipp, 2020. Studienarbeit
- [24] Untersuchungen zur dreidimensionalen Vermessung von Unfallstellen unter Verwendung verschiedener Daten, Helbig Frank, 2021. Diplomarbeit
- [25] Bewertung der Qualität von 3D-Punktwolken in der Unfallrekonstruktion, Richter Philipp, 2021. Diplomarbeit

Literatur

- [26] <https://dr-clauss.de/> , Zugriff: 03.05.2023 14:00
- [27] https://de.wikipedia.org/wiki/Renault_Kangoo, Zugriff 03.05.2023 14:30
- [28] https://www.canon.de/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_6d/specification.html, Zugriff 03.05.2023 15:30
- [29] <https://www.canon.de/lenses/ef-16-35mm-f-2-8l-ii-usm-lens/specification.html>, Zugriff 03.05.2023 15:45
- [30] Software RealityCapture, Hilfemenü „Wie man Fotos macht“, Zugriff 03.05.2023 7:00
- [31] Software RealityCapture, Hilfemenü „Was sind Marker?“, Zugriff 03.05.2023 17:30
- [32] <https://www.epicgames.com/site/en-US/news/capturing-reality-is-now-part-of-epic-games>, Zugriff 04.05.2023 10:00
- [33] <https://www.capturingreality.com/> , Zugriff 04.05.2023 10:00
- [34] <https://www.realitycapture-training.com/faq-realitycapture-deutsch/> , Zugriff 04.05.2023 10:30
- [35] Software RealityCapture, Hilfemenü „Hilfe“, Zugriff 04.05.2023 10:30
- [36] Software RealityCapture, Hilfemenü „Schnellstart“, Zugriff 04.05.2023 11:00
- [37] <https://www.faro.com/de-DE/Products/Hardware/Freestyle-2-Handheld-Scanner>, Zugriff: 05.05.2023 09:00
- [38] <https://www.faro.com/de-DE/Products/Software/SCENE-Software>, Zugriff 05.05.2023 11:00
- [39] <https://www.samyang.de/xp-10mm-f-3.5-canon-ef-ef-s> , Zugriff: 09.05.2023 18:45
- [40] https://www.samyang.de/downloads/xp/xp-10mm-f3.5-canon-ef_datenblatt.pdf, Zugriff: 09.05.2023 18:45
- [41] <https://dr-clauss.de/rodeon-pixplorer-100/>, Zugriff: 11.05.2023 17:00
- [42] <https://dr-clauss.de/produkt/horizontalstativ-slide-boom/>, Zugriff 11.05.2023 17:30
- [43] <https://dr-clauss.de/produkt/panoramastativ/>, Zugriff 11.05.2023 18:00
- [44] <https://en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare>, Zugriff 12.05.2023 15:30

Literatur

- [45] <https://www.cloudcompare.org/main.html>, Zugriff 12.05.2023 16:00
- [46] <https://www.laserscanning.at/produktkatalog/faro-freestyle-2-handheld-scanner/>, Zugriff 11.06.2023 16:30
- [47] <https://shop.laserscanning-europe.com/FARO-Freestyle-2-mieten>, Zugriff 11.06.2023 16:45
- [48] https://www.ideal.de/preisvergleich/OffersOfProduct/3536193_-eos-6d-canon.html, Zugriff 11.06.2023 17:00
- [49] <https://www.amazon.de/Canon-16-35-2-8L-Ultra-Weitwinkel-Zoomobjektiv/dp/B000NP46K2?th=1>, Zugriff 11.06.2023 17:00

Anlagen

Anlage 1: Daten zur Unfallrekonstruktion [6, Seite 28]

Tabelle 3: Daten zur Unfallrekonstruktion [6, Seite 28]

Allgemeine Unfalldaten	Daten vom Unfallort	Daten vom Unfallfahrzeug	Daten von Unfallbeteiligten	Sonstige Unfalldaten
<p>Unfalldaten, -zeit, -ort, Dienststelle</p> <p>Angaben zu:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Beteiligten - Zeugen - Fahrzeug - halter <p>Technische Daten der Fahrzeuge und bildliche Darstellungen</p> <p>Unfallart:</p> <p>Charakteristika und Besonderheiten der Unfallstelle</p> <p>Verkehrsregelungen</p> <p>Lichtverhältnisse</p>	<p>Reifenspuren</p> <p>Fahrspuren</p> <p>Walkspuren</p> <p>Bremsspuren</p> <p>Driftspuren</p> <p>Schleuderspuren</p> <p>Reifenabdrücke</p> <p>Unstetigkeit in Reifenspuren</p> <p>Spuren von Fahrzeugteilen</p> <p>Schleifspuren</p> <p>Kratzspuren</p> <p>Lage von Fahrzeugteilen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Glassplitter - Lacksplitter - abgerissene Teile 	<p>Spuren am Fahrzeug</p> <p>Wischspuren</p> <p>Abdrücke</p> <p>Auf-/ Abriebspuren</p> <p>Beschädigungen</p> <p>Deformationen</p> <p>Einriss, Abriss, Bruch</p> <p>Spuren im Fahrzeug</p> <p>Wischspuren</p> <p>Abdrücke</p> <p>Beschädigungen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Deformationen <p>Einriss, Abriss, Bruch</p> <p>Spuren an den Rückhaltesystemen:</p>	<p>Persönliche Daten:</p> <ul style="list-style-type: none"> Alter Geschlecht Gewicht Körpermaße Vorerkrankungen -äußere -innere Frakturen Alkohol Drogen Spuren an der Bekleidung 	<p>Fahrtschreiberdiagramm</p> <p>Unfalldatenschreiber</p> <p>Lichttechnische Daten</p> <p>Meteorologische Daten</p> <p>Auslesung von elektronischen Datenspeichern</p> <p>Mikrospuren</p>

Anlagen

Tabelle 3 (Fortsetzung): Daten zur Unfallrekonstruktion

Allgemeine Unfalldaten	Daten vom Unfallort	Daten vom Unfallfahrzeug	Daten von Unfallbeteiligten	Sonstige Unfalldaten
	Flüssigkeiten Schmutzablagerungen Endlage von Personen Blut-/Gewebe spuren Gegenstände Abriebspuren Endstellungen von Fahrzeugen	Gurtmarke - Umlenkbeschlag - Kraftbegrenzer - Gurtrolle - Gurtschloss - Sensoren Passive Systeme: Airbag-Sensoren Sitzbelegungs-erkennung Airbag-deaktivierung		

Anlagen

Anlage 2: Geräte zur Sicherung von objektiven Merkmalen [6, Seite 35]

Tabelle 4: Geräte zur Sicherung von objektiven Merkmalen [6, Seite 35]

Geräte	Standard	Empfohlen	Geräte	Standard	empfohlen
Klemmbrett	X		Handlampe	X	
Fotoapparat	X		Blitzlicht	X	
Kreide	X		Pylonen		X
Sprühkreide	X		Diktiergerät	X	
Ölkreide	X		Feuerlöscher		X
Klebeband	X		Magnetpfeile	X	
Bandmaß, Zollstock, Messrad	X		Bremsverzögerungsmessgerät		X
Permanentmarker	X		Warnbekleidung	X	
Reifenmanometer	X		Reifenprofiltiefenmesser	X	
Messlatten	X		Einrichtung für Überkopfaufnahmen		X



**Premium-Vorschau:
Das Nonplusultra der
3D-Datenerfassung**

Der neue FARO® Focus Premium Laserscanner ist der schnellste und genaueste Scanner auf dem Markt und verfügt über die effizientesten Möglichkeiten zum Datenaustausch. Er enthält völlig neue Komponenten bei einem erprobten Design und baut auf unseren bewährten Stärken wie Genauigkeit und Zuverlässigkeit auf.

🕒 Bis zu 50 % reduzierte Scandauer
Ein durchschnittlicher Scanvorgang dauert ungefähr 1 Minute – in Kombination mit dem optionalen FARO PanoCam-Upgrade ist der Scan sogar in Farbe möglich.

🛡️ Zwei Jahre Garantie
Wettbewerbsfähige Dienste anzubieten, bedeutet auch, die Produktlebensdauer zu erhöhen und gleichzeitig die Gesamtbetriebskosten während der gesamten Lebensdauer des Geräts zu senken. Eine zweijährige Garantie bietet maximale Flexibilität und die Gewissheit, dass Reparaturen übernommen und mangelhafte Teile ersetzt werden.

🌀 Höchste Farbauflösung
Dank der neuesten Farbkameratechnologie kann der Focus Premium Scans mit bis zu 266 Megapixel Farbinformation erfassen.

Im Detail

Der Focus Premium sorgt bei professionellen Anwendungen in den Bereichen Bauwesen, öffentliche Sicherheit, Betrieb und Wartung sowie Fertigung für höchsteffiziente Datenerfassung, herausragende Datenqualität und Genauigkeit. Schnellere Scanvorgänge (bis zu 1 Minute pro Scan) reduzieren außerdem die Scandauer vor Ort um bis zu 50 %. Wenn der Focus Premium mit der neuen mobilen App FARO Stream verbunden und die Daten in die neue cloudbasierte Kollaborationsplattform FARO Sphere hochgeladen werden, führt dies außerdem zu schnelleren Ladevorgängen und Systemreaktionen und letztlich zu einer effizienteren Datenverwaltung.

Funktionen des Focus Premium:

- Abtastweite von bis zu 350 m – sorgt für überragende Flächenabdeckung bei jeder Scanposition
- Fernsteuerungsfunktionen übers Smartphone – nur durch die Reichweite des WLANs begrenzt
- Verbesserter drahtloser Arbeitsablauf – mit stabilerem und schnellerem WLAN-Betrieb
- Vor-Ort-Registrierung – das Kombinieren mehrerer Scans durch Überlappungen führt zur schnelleren Projektentwicklung und Echtzeiterkennung von Scanfehlern sowie fehlenden Daten
- Nahtlose Konnektivität – dank Stream und Sphere
- Scanner-Steuerung – kann über die App oder den Focus selbst ausgeführt werden
- Unkomplizierter Zugriff durch die Benutzer – um Projekte zu erstellen, die Scannereinstellungen zu ändern, die Bildauflösung zu verwalten, zwischen Farb- und Schwarz-Weiß-Scans auszuwählen, Scans durch Cluster zu gruppieren und Anmerkungen hinzuzufügen
- Robuste Konstruktion und strapazierfähiges Gehäuse – können der Belastung durch die tägliche Arbeit standhalten
- Integrierter High-Speed-SSD-Datenspeicher – für maximale Scankapazität und blitzschnelle Scanverarbeitung

Leistungsspezifikationen			
Reichweite	Focus Premium 350	Focus Premium 150	Focus Premium 70
Eindeutigkeitsintervall	614 m für bis zu 0,5 MPts/Sek. 307 m bei 1 MPts/Sek. 153 m bei 2 MPts/Sek.	614 m für bis zu 0,5 MPts/Sek. 307 m bei 1 MPts/Sek. 153 m bei 2 MPts/Sek.	614 m für bis zu 0,5 MPts/Sek. 307 m bei 1 MPts/Sek. 153 m bei 2 MPts/Sek.
Reichweite			
Weiß, 90% Reflexionsvermögen	0,5-350 m	0,5-150 m	0,5-70 m
Dunkelgrau, 10% Reflexionsvermögen	0,5-150 m	0,5-150 m	0,5-70 m
Schwarz, 2% Reflexionsvermögen	0,5-50 m	0,5-50 m	0,5-50 m
Rauschbereich ^{1,2}			
Weiß, 90% Reflexionsvermögen	0,1 mm bei 10 m, 0,2 mm bei 25 m		
Dunkelgrau, 10% Reflexionsvermögen	0,3 mm bei 10 m, 0,4 mm bei 25 m		
Schwarz, 2% Reflexionsvermögen	0,7 mm bei 10 m, 1,2 mm bei 25 m		
Max. Geschwindigkeit	Bis zu 2 MPts/Sek.		
3D-Genauigkeit ⁴	2 mm bei 10 m, 3,5 mm bei 25 m		
Fehler im Bereich ¹	±1 mm		
Eckige Genauigkeit ⁴	19 Bogensekunden		
LaserHDR	Ja		
Temperaturbereich ⁴	Betrieb: +5° bis +40 °C, Erweiterter Betrieb: -20° bis +55 °C, Lagerung: -10° bis +60 °C		

Weitere Leistungsspezifikationen	
Farbelement	
Farbauflösung	Bis zu 266 MP Farbe
Rohfarbauflösung	867 MP
HDR-Kamera	13 MP - Belichtungsreihen 2x, 3x, 5x
Parallaxe	Durch koaxiale Konstruktion minimiert
Ablenkeinheit	
Sichtfeld	300° vertikal ⁶ / 360° horizontal
Schrittweite	0,009° (40.960 Punkte auf 360°) vertikal / 0,009° (40.960 Punkte auf 360°) horizontal
Max. Scangeschwindigkeit	97 Hz (vertikal)
Laser (optischer Sender)	
Laserklasse	Laserklasse 1
Wellenlänge	1553,5 nm
Strahldivergenz	0,3 mrad (1/e)
Strahldurchmesser am Ausgang	2,12 mm (1/e)
Datenmanagement und Steuerung	
Datenspeicherung	SATA 3.0 SSD 128 GB und SDXC™ V30 64 GB SD-Karte; SD3.0, UHS-I / SDXC™ / SDHC™, max. 512 GB
Scanner-Steuerung	Über Touchscreen-Display und WLAN-Verbindung, Steuerung durch FARO Stream-App (iOS & Android) oder mobile Geräte, mit HTML5
Verbindungsschnittstelle	
WLAN	IEEE 802.11 ac/a/b/g/n 2x2 MIMO, als Access Point oder Client in vorhandenen Netzwerken (2,4 und 5 GHz)
USB	USB-3-Anschluss

Weitere Merkmale	
Doppelachsen-Kompensator	Führt eine Nivellierung jedes Scans mit einer Genauigkeit von 19 Bogensekunden innerhalb von ±2° durch
Höhensensor	Mit einem elektronischen Barometer kann die Höhe in Bezug auf einen festen Punkt erkannt und zu einem Scan hinzugefügt werden
Kompass ¹⁰	Die Ausrichtung des Scans erfolgt mit dem elektronischen Kompass.
GNSS	Integriertes GPS und GLONASS
Vor-Ort-Kompensation	Erstellt einen Bericht über die aktuelle Qualität und verbessert die Kompensation automatisch
Zubehöraufnahme	Über die Zubehöraufnahme kann verschiedenes Zubehör an den Scanner angeschlossen werden
Seitenverkehrte Aufstellung	Ja
Vor-Ort-Registrierung in Echtzeit	Scan-Streaming in Echtzeit mit Stream-App, Registrierung, Übersichtskarte und Cloud-Upload mit Sphere
Elektronische Automatisierungsschnittstelle	Als Option und nur bei Verkaufsstellen erhältlich
Digitale Hashing-Funktion	Scans werden vom Scanner mit der Hashing-Funktion verschlüsselt und signiert
Erneutes Scannen von entfernten Passmarken	Neuerfassung definierter Bereiche in höherer Auflösung und größerer Entfernung
Erneute Aufnahme von Fotos	Einzelne Fotos mit unerwünschten Objekten auswählen und erneut aufnehmen

Allgemeine Spezifikationen	
Stromversorgung	19 V (externe Stromversorgung), 14,4 V (interner Akku)
Durchschnittlicher Stromverbrauch	19 W im Leerlauf, 32 W beim Scannen, 72 W beim Laden
Durchschnittliche Akkulaufzeit	Etwa 4 Stunden
Durchschnittliche Scandauer ⁸	Etwa 1 Minute
IP-Schutzklasse (Ingress Protection)	IP54
Feuchtigkeit	Nicht kondensierend
Gewicht	4,4 kg (einschließlich Akku)
Größe/Abmessungen	230 x 183 x 103 mm
Kalibrierung	Jährlich empfohlen
Herstellergarantie	2 Jahre



1. Weiß 90 % Reflektivität, Dunkelgrau 10 % Reflektivität, Schwarz 2 % Reflektivität, bei einem Lambertischen Streuer |
2. Distanzrauschen bezeichnet die Variation von Abstandsproben aus wiederholten Messungen eines einzelnen Punktes bei 122.000 Punkten/Sek. |
3. Manche Oberflächen können zusätzliches Rauschen verursachen |
4. Für Entfernungen von mehr als 25 m bitte 0,1 mm/m Messgenauigkeit einberechnen |
5. Distanzfehler bezeichnet einen systematischen Messfehler bei ca. 10 m und 25 m |
6. Es wird empfohlen, eine Vor-Ort-Kompensation vorzunehmen, wenn das Gerät außergewöhnlichen Temperaturen oder mechanischer Belastung ausgesetzt ist |
7. Betrieb bei niedrigen Temperaturen: Der Scanner muss eingeschaltet werden, wenn die Innentemperatur mindestens 15 °C beträgt. Betrieb bei hohen Temperaturen: Wärmeabdeckung als zusätzliches Zubehör erforderlich |
8. Beschleunigtes Profil mit PanoCam |
9. 2 x 150°, homogener Punktabstand ist nicht gewährleistet

Bei den Genauigkeitsangaben handelt es sich um Standardabweichungen nach dem Aufwärmen und innerhalb des Betriebstemperaturbereichs (sofern nicht anders angegeben). Änderungen vorbehalten.

Bild 95: Datenblatt FARO Focus (2) [18]

Anlagen

Anlage 4: Datenblatt Kamera Canon EOS 6D



Bild 96: Kamera Canon EOS 6D Seite [28] Bild 97: Kamera Canon EOS 6D Front [28]

Tabelle 5: Daten Canon EOS 6D [8], [28]

Typ	Digitale Autofokus/AE-Spiegelreflexkamera
Objektiv	EF-Objektive (ausgenommen EF-S Objektive)
Objektivanschluss	Canon EF-Bajonett
Bildsensor	CMOS-Sensor
Sensorgroße	Kleinbild (35,8 mm x 23,9 mm)
Auflösung	20 Megapixel
Bildprozessor	DIGIC 5+ Prozessor
Brennweite	abhängig vom EF Objektiv;
ISO-Empfindlichkeit	Auto (100-25.600), 100-25.600 (in ganzen oder Drittelstufen), erweiterbar
Verschluss	elektronisch gesteuerter Schlitzverschluss
Verschlusszeit	30-1/4.000 s (halbe oder Drittelstufen)
LCD-Monitor	7,7 cm (3,0 Zoll) Clear View TFT-Display, ca. 1.040.000 Bildpunkte
Abmessungen (B x H x T)	ca. 144,5 x 110,5 x 71,2 mm
Gewicht	ca. 755 g (Gehäuse inkl. Akkumulator und Speicherkarte)

Anlagen

Anlage 5: Technische Daten Canon G7X [23]

Die Canon G7X (Abbildung 1) besitzt einen leistungsstarken CMOS-Sensor mit 20,1 Megapixel und einer Größe von 13,2 x 8,8 mm. Sie gehört zur Klasse der Kompaktkameras. Sie erreicht eine Fotogröße von bis zu 5.472 x 3.648 Pixel. Die Lichtempfindlichkeit der Kamera kann zwischen ISO 100 und ISO 12.800 eingestellt werden. Die Kompaktkamera wurde für die ersten vier Versuche genutzt.



Abbildung 1: Canon G7X [3]

Bild 98: Technische Daten Canon G7X [23]

Anlagen

Anlage 6: Technische Daten Nikon D3100 mit Objektiv AF-S Nikkor 18-105 mm [23]

2.1.5 Technische Daten der Nikon D3100 mit Objektiv AF-S Nikkor 18-105 mm

Die Nikon D3100 (Abbildung 2) ist eine Spiegelreflexkamera mit 14,2 Megapixel und wurde für den letzten Versuch der Studie genutzt. Sie erreicht eine Fotogröße von maximal 4.608 x 3.072 Pixel. In der Kamera ist ein CMOS-Sensor mit einer Größe von 23,1 x 15,4 mm verbaut. Die kleinste nominale Brennweite der Kamera liegt bei 18 mm und ihr Crop-Faktor (Formatfaktor) beträgt 1,5.



Abbildung 2: Spiegelreflexkamera Nikon D3100

Bild 99: Technische Daten Nikon D3100 [23]

Anlagen

Anlage 7: Zusammenfassung der Ergebnisse der Studienarbeit von Herrn Richter Philipp [23]

Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse der Studienarbeit von Herrn Richter Philipp [23]

Versuch	3.2 BMW F30 Kompaktkamera	3.3 Opel Corsa D Kompaktkamera	3.4 Opel Corsa D Kompaktkamera Abgeklebte Scheiben	3.6 Opel Corsa Spiegelreflex
Anzahl fotografierter Fotos	105	189	595	720
Anzahl registrierter Fotos während der Fotoausrichtung	68	120	233	626
Fotoausrichtungszeit	2 min 26 sec	4 min 38 sec	15 min	24 min 38 sec
Anzahl Gesamtprojektionen	108.723	218.233	194.500	1.788.555
durchschnittlicher Projektionsfehler	0,672 Pixel	0,551 Pixel	0,596 Pixel	0,569 Pixel
durchschnittliche Streckenlänge (je größer, desto besser)	2,497 Pixel	2,425 Pixel	2.639 Pixel	2,794 Pixel
Anzahl Fotos der Komponente die für die Rekonstruktion genutzt wurde	64	87	100	565
Rekonstruktionszeit normales Detail	x	x	24 min	1h 29 min
Rekonstruktionszeit hohes Detail	37 min	1h 23 min	x	x
Anzahl Modell Teile	6	34	13	13
Anzahl Dreiecke	9,4 Millionen	44,2 Millionen	17,9 Millionen	22,2 Millionen
Anzahl Eckpunkte	4,7 Millionen	22,1 Millionen	9 Millionen	11,1 Millionen
Texturierungszeit	x	5 min 51 sec	7 min 29 sec	25 min 23 sec
Texturqualität	x	32%	47 %	53%

Anlagen

Anlage 8: Punktplatten [24]

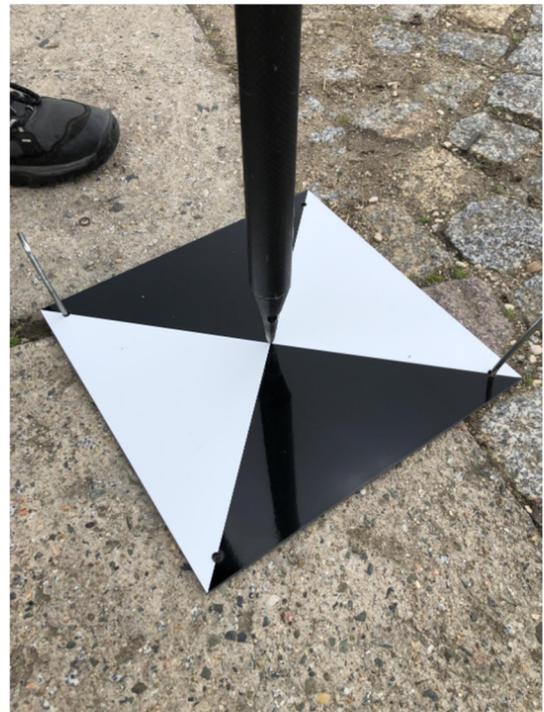


Bild 100: Punktplatten matt und glänzend (links) [24]

Bild 101: Punktplatte vermessen mit Tachymeter (rechts) [24]



Bild 102: Position Punktplatten [24]

Anlagen

Anlage 9: Tachymeter GeoMax Zoom90 [24]



Bild 103: GeoMax Zoom90 [24]

Anlagen

Anlage 10: 3D-Laserscanner FARO FOCUS M70 [24]



Bild 57: FARO FOCUS M 70

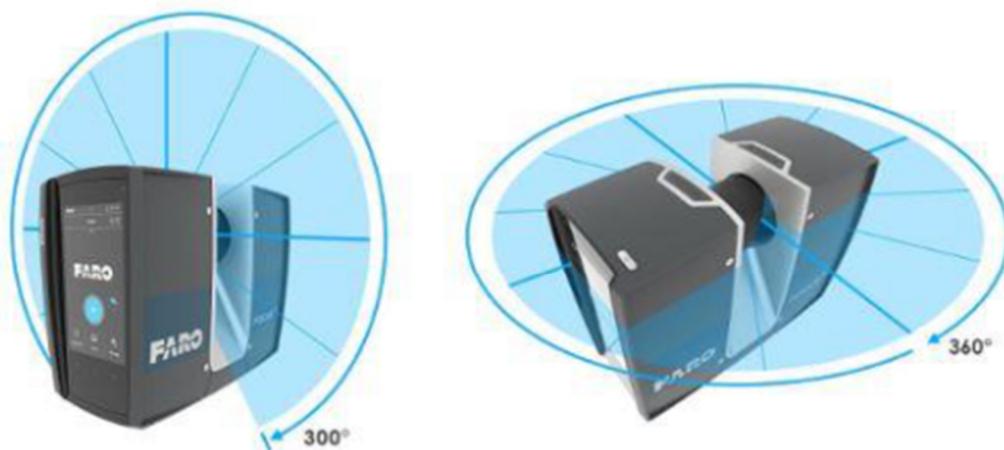


Bild 58: Vertikale und Horizontale Rotation FARO [78, S. 12]

Bild 104: FARO FOCUS M 70 [24]

Anlagen

Anlage 11: Drohne DJI Phantom FC300X [24]



Bild 53: DJI Phantom FC300X



Bild 105: DJI Phantom FC300X [24]

Anlagen

Anlage 12: Datenblatt Objektiv Canon EF 16-32mm f/2.8L II USM [29]



Bild 106: Objektiv Canon EF 16-32mm f/2.8L II USM [29]

Tabelle 7: Datenblatt Objektiv Canon EF 16-32mm f/2.8L II USM [8], [29]

Typ	Superweitwinkel-Zoomobjektiv
konstante Blendenöffnung	1:2,8 (über gesamten Zoombereich)
kleinste Blende	22
Naheinstellgrenze (m)	0:28
AF-Motor	Ring-USM, schnelle und leise automat. Scharfstellung (manuelle Scharfstellung möglich)
Max. Durchmesser x Länge (mm)	ca. 88,5 x 111,6
Gewicht (g)	ca. 640
geeignet für	schwache Lichtverhältnisse
Vorteile	<ul style="list-style-type: none">- Asphärische und UD-Linsen- Super-Spectra-Vergütung- Weiterleitung der Entfernungsinformationen an die E-TTL II Blitzsteuerung der Kamera

FARO® Freestyle 2 Handheld Scanner

Der mobilste 3D-Scanner für eine schnelle, fotorealistische 3D-Realitätserfassung

FARO Freestyle 2 ist ein erstklassiger 3D-Handscanner für Experten, die eine schnelle und problemlose vollständige Schauplatzdokumentation benötigen. Der Freestyle 2 bietet eine schnelle, fotorealistische 3D-Realitätserfassung und besticht durch unvergleichliche Anzeigenergebnisse in Echtzeit. Dadurch ermöglicht er eine totale Mobilität zum Scannen – selbst in stark beengten Räumen und für die kompliziertesten Objekte.



Funktionen

- Echtzeitvisualisierung**
 - Die Anzeige informiert Sie darüber, was beim Scannen erfasst wird
- Großer Distanzbereich**
 - Erfasste 3D-Punkte beginnen bei 0,4 m
 - Kann auf maximal 10 m festgelegt werden
- Erfassung mit einer Vielzahl an Beleuchtungszuständen**
 - Für normal beleuchtete Innen- und Außenbereiche konzipiert
 - Stellt selbst bei vollständiger Dunkelheit brauchbare Daten bereit
- Einhändige Bedienung**
 - Geringes Gewicht, kein sperriges Tablet und keine langen Kabel
- Scannen unter Anleitung**
 - Der Bediener wird durch haptisches Feedback darüber informiert, wenn die Scantechnik des Benutzers angepasst werden muss
 - Eigene Tracking-Engine ermöglicht Benutzern das Ausführen natürlicher Bewegungen während des Scannens
- Vor-Ort-Kompensation**
 - Weißabgleich, Nachbearbeitung in der Szene möglich
 - Keine jährliche Kalibrierung erforderlich
- Integrierte Schulung**
 - Live-Anzeige der Datenqualität mit integrierten und verständlichen Schulungsvideos

www.faro.com



Bild 107: FARO Freestyle 2 Datenblatt (1) [37]

Vorteile

Ultimative Flexibilität

- Freestyle 2 ist extrem portabel, denn es werden keine sperrigen Computer benötigt
- Die in sich geschlossene Einheit bietet die Freiheit, Objekte oder Innenräume sehr schnell und einfach zu scannen

Zeitersparnis

- Scannen Sie Szenen und Objekte ohne Datenverluste in wenigen Minuten
- Erfasst Daten problemlos und mit mehr Details bei weniger Zeitaufwand

Fotorealistische Ergebnisse

- Qualitativ hochwertige, farbige, 3D-Daten mit einer Genauigkeit von bis zu 0,5 mm

Sicherheit bei der Erfassung

- Datenanzeige während der Erfassung, um die erwarteten Ergebnisse sicherzustellen

Leicht erlernbar und benutzerfreundlich

- Moderne Benutzeroberfläche, eigene Tracking-Algorithmen, integrierte Video-Lernprogramme

Leistungsspezifikationen	
Reichweite	0,4-5 m (bis zu 10 m mit eingeschränkter Datenqualität)
Identifizierbare Merkmale	Bis zu 0,2 mm
3D-Punkt-Genauigkeit ¹	≤0.5 mm
Genauigkeit bei größerer Entfernung ²	0,5 mm bei 1 m Abstand 5 mm bei 5 m Abstand 15 mm bei 10 m Abstand
Punktichte Einzelbild	Bis zu 45.000 Punkte/m ² bei 0,5 m Abstand Bis zu 10.500 Punkte/m ² bei 1 m Abstand
Erfassungsrate ³	Bis zu 220.000 Punkte/s, Dichte der Punktwolke nimmt im Zeitverlauf zu
Typisches Rauschen ⁴	• 0.3 mm bei 0.4 m Abstand • 35 mm bei 5 m Abstand • 0.75 mm bei 1 m Abstand • 100 mm bei 10 m Abstand • 10 mm bei 3 m Abstand
Lichtbedingungen ⁵	Vollständiges Tageslicht, 10.000-45.000 Lux (reduzierte Leistung bei direktem Sonnenlicht)
Lichtquelle	Integrierter LED-Blitz
Scanvolumen	39,5 m ³ bei 5 m Maximalbereich
Typisches Sichtfeld (HxB)	• 420 mm x 550 mm bei 0,5 m • 2740 mm x 3160 mm bei 3 m • 930 mm x 1170 mm bei 1 m • 3600 mm x 4160 mm bei 4 m • 1800 mm x 2160 mm bei 2 m • 4470 mm x 5150 mm bei 5 m
Belichtungsdauer:	0,1 ms-7 ms (automatische Belichtung)
Texturfarbe	24 Bit
Abmessungen	285 mm x 256 mm x 130 mm
Konnektivität	HDMI, USB 3.0, WiFi
Gewicht	1.48 kg
IP-Schutzklasse	IP 52
Kompensation	Vor Ort - mit mitgelieferter Kompensationsplatte
Betriebstemperaturbereich	0-40 °C
Betriebsluftfeuchtigkeitsbereich	Nicht kondensierend
Augenschutz	Laserklasse 1
Wellenlänge	798-816 nm

¹ 1-Sigma-Standardabweichung gemessen an Referenzskalen der Länge zwischen 0,3 m und 1 m, in 1 m Abstand, für eine seitliche Scannerbewegung von 1 m, mit Zielen für die Abstandsmessung | ² Typischer Fehler bei gemessenen Abständen | ³ Punktdichte abhängig von der gescannten Fläche und den Lichtbedingungen | ⁴ RMS | ⁵ Eingeschränkter Bereich und eingeschränkte Punktdichte bei Sonnenlicht

* Staubschutz 5. Wasserschutz 2: Schutz vor Tropfwasser, während sich das Gerät in der Standard-Leerlaufposition befindet und die Sensorseite nach unten zeigt.

Mobil-PC-Spezifikationen
Microsoft Windows 10 Pro, 64-Bit Intel® Core™ i7
256-GB-Festplatte, 16 GB RAM
HDMI; USB 3.0-Ports; WiFi

Lokale Niederlassungen in mehr als 25 Ländern weltweit. Weitere Informationen erhalten Sie unter www.faro.com.

FARO Global Headquarters
250 Technology Park, Lake Mary, FL 32746, USA
US: 800 736 0234 MX: +52 81 4170 3542
BR: 11 3500 4600 / 0800 892 1192

FARO Europe Regional Headquarters
Lingwiesenstr. 11/2
70825 Korntal-Münchingen, Germany
00 800 3276 7253

FARO Asia Regional Headquarters
No. 3 Changi South Street 2, #01-01 Xilin
Districentre Building B Singapore, 486548
+65 6511 1350

© 2021 FARO | FARO is a registered trademark of FARO Technologies, Inc. in the United States and other countries.

SFDC_04MKT_380 Revised: 03/18/2021

Bild 108: FARO Freestyle 2 Datenblatt (2) [37]

FARO® SCENE Software

Intuitive und effiziente Software für die Verarbeitung und Registrierung von Scandaten

Tools zur Verwaltung hochwertiger 3D-Daten für fundierte Projektentscheidungen

Die Software FARO SCENE ist speziell für alle FARO-Scanlösungen und Drittanbieter-Laserscanner konzipiert, Verarbeiten und verwalten Sie Scandaten effizient und einfach durch automatische Zielerkennung, Scan-Registrierung und Validierung. Erstellen Sie schnell und einfach hochwertige Daten in Vollfarbe, indem Sie Farbbilder von automatisierten Scanpositionierungen mit und ohne Passmarken einbinden.

Anwender können sofort mit der Auswertung und Verarbeitung beginnen, indem sie einfache Messungen vornehmen, beeindruckende 3D-Visualisierungen erstellen oder in unterschiedliche Punktwolken- und CAD-Formate exportieren, sobald SCENE die Scandaten vorbereitet hat. SCENE's beeindruckende Virtual-Reality-Ansicht ermöglicht das Betrachten und Auswerten der erfassten Daten mit VR-Geräten.

Überprüfung von Scandaten in 2D, 3D und innerhalb der virtuellen Realität (VR)

Erkunden Sie Scandaten in unübertroffener Klarheit und visueller Qualität dank Rendering zu geschlossenen Oberflächen und HDR-Einfärbung. Die Daten werden in 2D, 3D und 3D-Virtual Reality (VR) dargestellt. Die Betrachtung und Auswertung detaillierter Projekt-Punktwolken in VR bietet ein beeindruckendes Erlebnis.

Effiziente Datenverarbeitung

Verschiedene Tools für die Filterung von Scandaten verbessern die Klarheit und Farbbalance eines jeden Datensatzes. Der automatische Filter für bewegte Objekte reduziert den Bedarf an manueller Korrektur erheblich. Stapelverarbeitungen erkennen Marker automatisch und minimieren den Aufwand bei der Optimierung und Registrierung von Scans.

Einfache Datenregistrierung

SCENE stellt professionelle und automatische Workflows für eine Scanregistrierung mit oder ohne Passmarken bereit (Cloud2Cloud). Die leistungsstarke Vor-Ort-Registrierung verarbeitet und registriert Scans zu einem Projekt in Echtzeit direkt am Ort der Messung.

Intuitive Datenorganisation

SCENE ist sehr leicht und intuitiv zu bedienenden. Dank der hierarchischen Datenstruktur und der Projektverlauf-Verwaltung werden große Projekte effizient bearbeitet. Die Unterstützung zahlreicher Import- und Export-Formate stellt eine nahtlose Integration der Scandaten sicher.

Plug-Ins und Apps für erweiterte Funktionen

Erweitern Sie die Funktionalität von SCENE mit verschiedenen Plug-ins und Apps und ziehen Sie Nutzen aus speziellen Workflows und Anwendungen.



Vorteile

- Minimierung von Projektkosten durch automatisierte Datenverarbeitungs- und Registrierungsworkflows, schnellen / vielseitigen Scandatenexport und vereinfachte Software-Benutzeroberfläche
- Nachvollziehen von Projektergebnissen mithilfe fortschrittlicher workflow-gesteuerter Validierungstools
- Intuitive und leicht verständliche Realitätsdarstellung mit beeindruckenden Anzeigemöglichkeiten zur Erkundung und Auswertung von Scandaten
- In Echtzeit ausgeführte Vor-Ort-Registrierung und die Möglichkeit zur Wiederholung von Bildern garantieren Vertrauen in bestmögliche Ergebnisse
- Beste Benutzererfahrung mit FARO-Scanneräten und anwendungsspezifischen Softwaretools von FARO
- Mit dem webbasierten Dienst SCENE WebShare Cloud können sie einfach und sicher Scan-Projektdateien austauschen und mit ihnen gemeinsam arbeiten - jederzeit und weltweit

www.faro.com

FARO

Bearbeiten von Scandaten

- Automatische Suche nach künstlichen (Kugeln, Checkerboards, codierte Marker) oder natürlichen Referenzen (Ecken, Ebenen)
- Verschiedene Registrierungsmethoden, um die Scans automatisch nach erkannten Zielen, Cloud-to-Cloud oder nach Top View auszurichten
- Verbesserte Registrierungsergebnisse durch intelligente Feinregistrierung und zusätzliche Überprüfung
- Automatisches Einfärben der Scanaufnahmen mit den hochauflösenden Farbphotographien der Laser-HDR™ Farboption
- Filter (einschließlich „Dunkle-“ und „Streupunkte“), optionaler Kanten-Artifakten-Filter zur zusätzlichen Rauschunterdrückung
- Unterstützt die Erstellung und den Export von volltexturierten Meshes, kann in andere Anwendungen gebracht, farbig dargestellt und als 3D-Modell bearbeitet werden.
- Vor-Ort-Kompensation: Prüfung und Anpassung der Kompensationsparameter des Scanners, verfügbar für die neuen Focus³ Geräte
- Vor-Ort-Registrierung: Vor-Ort-Verarbeitung und -Registrierung von Scans während des Scannens, funktioniert nur mit Scannern der FARO Focus³ Serie
- Der Moving Objects Filter entfernt automatisch unerwünschte Objekte aus registrierten Scandaten, die sich während des Scannens durch eine Szene bewegt haben, wie z.B. Personen oder Fahrzeuge.
- Schneller und vielseitiger Export von Scandaten als Projekt, Cluster, Einzelscan oder Teils cans in das Autodesk® RCP/ RCS Punktwolkenformat.

Datenmanagement bei umfangreichen Projekten

- Projektdatenbank mit Projekthistorie
- Graphische Projektansicht zur Verwaltung aller Scan-Projekte
- Zusammenfassung beliebig vieler Einzels cans zu einem Projekt
- Ausdruckerbarer Registrierungsbericht (pdf)

Data Sharing

- Voll kompatibel mit SCENE WebShare Cloud und der neuen Lösung SCENE2go
- Nutzen Sie SCENE2go von einem USB Stick, um Projekte mit anderen zu teilen und gemeinsam auszuwerten

Import und Export

- Optimierte für die Arbeit mit FARO Focus-, Freestyle- und Swift-Daten
- Passpunkte zur Georeferenzierung (.cor, .csv)
- Scanpunkte (FARO Scan, FARO Cloud, ASTM E57, VRML, .txt, .xyz, .xyb, .pts, .ptx, .ptc, .ptz [nur Import], .pod [nur Export])
- Import digitaler Fotos (.jpg, .png, .bmp, .tif)
- Export Panoramabilder (.jpg), Export Orthofotos (.tiff, .png, .jpg, .bmp and .dxf)
- Export Vermaschung in Standardformate (.stl, .obj, .ply and .wrl (VRML))



Projekt Exploration

- Erstellen von virtuellen Scans
- Messungen
- Dokumentations-Objekte um Notizen und externe Dokumente per Hyperlink-Technologie an den Scan zu hängen.
- Erweiterte Funktionen mit von FARO oder Drittanbietern

Ansichten

- Vollfarbiges, detailliertes Rendering geschlossener 3D-Oberflächen
- 3D-Ansicht, flächenhafte Darstellung und Quick-View
- Virtual-Reality-Ansicht mit Erkundungswerkzeugen
- Stereoskopische Darstellung mit geeigneter Grafikkarte und 3D-fähigen Ausgabegeräten
- Korrespondierende Ansichten um Scan-Positionen auf dem Bildschirm zu arrangieren
- Multi-Clipping Boxen zur Kontrolle der Visualisierung in 3D
- Übersichtskarte

Technische Voraussetzungen (empfohlen)

Hardware	Intel Core i7/i9/Xeon, 8 physische Kerne, 64 GB RAM, OpenGL 4.3, 1 TB Solid State Drive + reguläre HDD, Bildschirmauflösung 1920 x 1080 px
Graphikarte	Dedizierte Grafikkarte, OpenGL 4.3, DirectX 11 Feature Level 11.0 oder höher, mindestens 8 GB Speicher; Für Stereowiedergabe und -betrachtung: NVIDIA Quadro; Für VR-Wiedergabe und -betrachtung: NVIDIA 1080GTX oder ähnlich, Unterstützte VR-3D-Headsets: Oculus Rift S oder HTC Vive mit Touch-Controllern, SteamVR
Betriebssystem	64-bit Windows™ 10
Zubehör	3D Connexion Space Mouse mit den neuesten Treibern (Einstellungen im Benutzerhandbuch beschrieben), Netzwerkkarte ist für die Lizenzierung von SCENE™ erforderlich.

Für die Vor-Ort-Registrierung (mit einer Scan-Auflösung von 1/5, Qualität 3, Kolorierung und ~ 40 Scans in Folge) sind die folgenden Systemspezifikationen ausreichend: Prozessor: i7 8665U, Grafik: Intel UHD 620 Grafik, Arbeitsspeicher: 16 GB, Festplatte: SSD 500 GB, Bildschirm: 12" Full HD mit Anti-Glare, Betriebssystem: Windows® 10 Pro 64-Bit

Lokale Niederlassungen in mehr als 25 Ländern weltweit. Weitere Informationen erhalten Sie unter www.faro.com.

FARO Global Headquarters
250 Technology Park, Lake Mary, FL 32746, USA
US: 800 736 0234 MX: +52 81 4170 3542
BR: 11 3500 4600 / 0800 892 1192

FARO Europe Regional Headquarters
Lingwiesenstr. 11/2
70825 Kornthal-Münchingen, Germany
00 800 3276 7253

FARO Asia Regional Headquarters
No. 3 Changi South Street 2, #01-01 Xilin
District Centre Building B Singapore, 486548
+65 65111350

© 2021 FARO | FARO is a registered trademark of FARO Technologies, Inc., in the United States and other countries. Autodesk is a registered trademark of Autodesk, Inc., in the USA and other countries.

SFDC_04MKT_423 Revised: 5/11/2021

Bild 110: Datenblatt FARO SCENE-Software (2) [38]

Anlagen

Anlage 15: Datenblatt Samyang XP 10mm f/3.5 Canon EF [39]

Technische Beschreibung

Allgemeine Angaben

Geräte/Produkttyp	Objektiv
Material des Produktes	Aluminium-Legierung
Produktfarbe	Schwarz
Länge	98,1mm
Breite	95mm
Höhe	95mm
Gewicht	780g

Technische Daten

Anwendungsbereich	Architektur, Landschaft, Natur, Reise, Outdoor, Indoor, Panoramabilder
Kameraanschluss / Mount	Canon EF
Entwickelt für	Vollformat
Geeignet für Sensor	APS-C, Vollformat
Brennweite	10 mm
Lichtstärke Objektiv	1:3,5
Blendenöffnungswerte	F3.5 - F22
Autofokus	Nein
Fokussierungsart	MF - Manueller Fokus
Innenfokussierung	Ja
Linse / Gruppen	18 / 11
Spezial Linse	1x HR - High Refractive, 3x ED - Extra Low Dispersion, 3x ASP - Aspherical
Anzahl Blendenlamellen	7
Naheinstellgrenze	0,26m
Durchmesser Objektiv	95mm
Durchmesser Filter	Kein Filtergewinde, Gegenlichtblende fest verbautmm
Gegenlichtblende	enthalten, Fest montiert
Bildwinkel an Vollformat	130°
Bildwinkel an APS-C	104°
Objektiv Bauart	Superweitwinkel, Ultra Weitwinkel
Objektiv Kategorie	Weitwinkel
Anwendungsbereich Objektiv	Architektur, Landschaft, Kunst, Reise, Natur Canon EOS 5DS R, Canon EOS 5DS, Canon EOS 5D Mark III, Canon EOS 1D Mark IV, Canon EOS 5D Mark II, Canon EOS 1Ds Mark III, Canon EOS 1D Mark III, Canon EOS 5D, Canon EOS 760D, Canon EOS 750D, Canon EOS 7D Mark II, Canon EOS 1200D, Canon EOS 70D, Canon EOS 100D, Canon EOS 650D, Canon EOS 1100D, Canon EOS 600D, Canon EOS 60D, Canon EOS 7D, Canon EOS 500D, Canon EOS 50D, Canon EOS 1000D, Canon EOS 450D, Canon EOS 40D, Canon EOS 400D, Canon EOS 30D, Canon EOS 350D, Canon EOS 700D, Canon EOS 550D, Canon EOS 80D, Canon EOS-1D Mark II N, Canon EOS-1D X, Canon EOS-1D X Mark II, Canon EOS 5D Mark IV, Canon EOS 1300D, Canon EOS 200D, Canon EOS 77D, Canon EOS 250D, Canon EOS 90D, Canon EOS 1Dx Mark II, Canon EOS 1Dx Mark III, Canon EOS 850D, Canon EOS 800D, Canon EOS 6D Mark II
Kompatible Kameramodelle	Foto
Verwendung	Foto

Artikelverpackung

Breite der Verpackung	130mm
Gewicht inkl. Verpackung	995g
Gurtmaß	845mm
Höhe der Verpackung	195mm
Länge der Verpackung	130mm
Verpackung mit Euroloch	Nein
Verpackungsmaterial	Karton

Lieferumfang

- 1x Samyang XP 10mm F3.5 Ultra-Weitwinkelobjektiv für Canon EF mit Gegenlichtblende
- 1x hochwertige Aufbewahrungstasche
- 2x Objektivdeckel

Bild 111: Datenblatt Objektiv Samyang XP 10mm f/3.5 Canon EF [40]

Anlagen

Anlage 16: Datenblatt CLAUSS piXplorer 100 [41]

TECHNISCHE DATEN

piXplorer 100



Aufnahmesystem *piXplorer* 100

Beschreibung
2-achsiges automatisches Aufnahmesystem

Aufnahmebereich
360° x 180°

Max. Bildauflösung
128 MegaPixel

Dynamikumfang
26 Belichtungsstufen

Aufnahmezeit
30 s pro Standort

Akkuleistung
ca. 650 Standorte

Ladedauer
ca. 4 h

Abmessungen (mm) / Masse (kg)
190 x 300 x 130 / 3,0

Betriebstemperatur
-5° C ... +40° C

Stativanschluss
3/8 Zoll Stativgewinde

Verarbeitungssoftware
piXplorer basic/prof/ultim

Beschreibung
Automatischer Stitch-Vorgang im Batch-Prozess

Systemvoraussetzung
PC mit Windows Vista/7/8/10/11 x32/x64

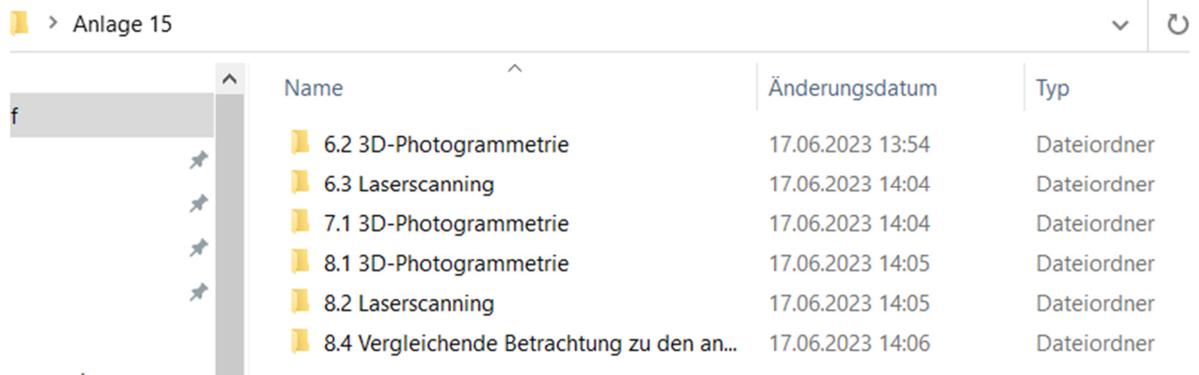
Verarbeitungszeit
5 min pro Standort (Referenzsystem: Intel i7 / 16 GB RAM, SSD-Drive, Windows 10)

Bild 112: Datenblatt CLAUSS piXplorer 100 [41]

Anlagen

Anlage 17: Ordnerstruktur Modelldaten und Bilder

Bild 112 zeigt die beigefügte Ordnerstruktur zu den Daten dieser Diplomarbeit. In den Ordnern 6.2 und 6.3 befinden sich die Daten zum Zeigen des Workflows der Programme Reality Capture und FARO SCENE. Im Ordner 7.1 sind die Bilder, die beim Versuch erstellt wurden, enthalten. Die Ordner 8.1, 8.2 und 8.4 beinhalten die Daten der erstellten Punktwolken. Eine Auflistung der Literatur ist unter <https://mega.nz/fm/ukx0zCiR> zu finden.



Name	Änderungsdatum	Typ
6.2 3D-Photogrammetrie	17.06.2023 13:54	Dateiordner
6.3 Laserscanning	17.06.2023 14:04	Dateiordner
7.1 3D-Photogrammetrie	17.06.2023 14:04	Dateiordner
8.1 3D-Photogrammetrie	17.06.2023 14:05	Dateiordner
8.2 Laserscanning	17.06.2023 14:05	Dateiordner
8.4 Vergleichende Betrachtung zu den an...	17.06.2023 14:06	Dateiordner

Bild 113: Ordnerstruktur Modelldaten und Bilder